

**Ursachen, Beeinflussung, Auswirkungen sowie Quantifizierung der
Temperaturentwicklung in der Fügezone beim Kollisionsschweißen**

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Christian Bernd Pabst, M. Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Mitberichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin F.-X. Wagner

Tag der Einreichung: 13.06.2019

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2019

Darmstadt 2019

D17

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Anschluss an meine fünfjährige Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen der Technischen Universität Darmstadt. Der Grundstein wurde während der Arbeiten an dem Projekt „Untersuchung der Bildungsmechanismen der Fügezone beim Kollisionsschweißen“ gelegt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Dieses Projekt ist Bestandteil des Schwerpunktprogrammes 1640 „Fügen durch plastische Deformation“, das den Austausch mit anderen wissenschaftlichen Mitarbeitern mit gleichem oder ähnlichem Schwerpunkt fördert, was letztlich auch dieser Arbeit zugute kam.

Neben der Arbeit an der Universität habe ich das Privileg (oder auch die Herausforderung) genossen, gleichzeitig bei der PSTproducts GmbH in der Forschung, Entwicklung und Konstruktion zu arbeiten. Sie ist Hersteller von Anlagen für die elektromagnetische Pulstechnologie, wozu auch die Auslegung der kundenspezifischen Fügeaufgaben und Werkzeugspulen gehört. Von dieser Erfahrung auf dem Gebiet der industriellen Anwendung des Prozesses haben die Forschungsarbeiten profitiert, ebenso wie diese Arbeit. Trotz der mit der Tätigkeit für zwei Arbeitgeber einhergehenden Anstrengungen war die Zeit auf jeden Fall eine wertvolle und in vielen Aspekten unvergessliche Erfahrung.

Über das Vorwort zum Vorlesungsskript „Werkstoffe der Elektrotechnik“ von Professor Fischer [Fis77] hinausgehend möchte ich zum Abschluss zwei Erfahrungen an die Hand geben. Als Ingenieur in der Entwicklung sollte der Anspruch stets sein, Probleme zu lösen, bevor sie auftreten oder von der Allgemeinheit als solche wahrgenommen werden. In der Forschung liegt die Herausforderung darin, umfassend zu beobachten und mit dem Fachwissen die richtigen Schlüsse daraus zu ziehen, um die Effekte anschließend praktisch nutzbar zu machen. Weiterführende „Hilfen“ seien an dieser Stelle Glückskeksen und den Rückseiten von Abreißkalenderblättern überlassen.

2019

Danksagung

Auf der ersten Seite soll mein Name nicht darüber hinweg täuschen, dass in über fünf Jahren eine Vielzahl von Personen mit unterschiedlichem Anteil dazu beigetragen haben, meine Forschungsarbeiten und diese Dissertation mit ihren Ergebnissen zu realisieren. Sie sind im Anhang aufgelistet.

Insbesondere während der letzten 20 Prozent der Fertigstellung dieser Dissertation hat mich meine Freundin Nicole immer wieder motiviert, die Arbeit voranzutreiben. Sie hat mich außerdem bei unserer Tochter Nina in dieser Zeit häufig vertreten. Außerhalb meiner beruflichen Arbeit waren es auch meine Eltern, die mir oft den Rücken frei gehalten haben, wenn die Arbeit und die Dissertation keinen Platz für den Alltag gelassen haben.

Mein Dank gilt natürlich auch meinen beiden Chefs, Herr Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche und Herr Dr.-Ing Pablo Pasquale, die diese Arbeit ermöglicht und mich in diesem Vorhaben bestärkt haben. Daneben möchte ich auch allen Kollegen am PtU für ihre Unterstützung danken, sei es bei der wissenschaftlichen Arbeit, der Administration oder der mechanischen Ausführung. Mein besonderer Dank gilt den vielen Studenten und HiWis, die mich in meiner Zeit am PtU bei der Projektarbeit unermüdlich unterstützt haben. Sie haben mit ihren Ergebnissen und Arbeiten einen wertvollen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet. Auch wenn die Arbeit bei PSTproducts zu einem geringeren Teil in diese Arbeit einfließt, so möchte ich doch allen Kollegen für ihren steten Einsatz für mich danken, ohne den diese doppelte Anstellung – und manchmal auch Büro- oder Haushaltsführung – nicht in der Form zu leisten gewesen wäre.

Daneben haben noch unzählige weitere Personen mitgewirkt, sei es von anderen Forschungsstellen weltweit oder Unternehmen, die als Lieferanten und Dienstleister am Gelingen dieser Arbeit einen nicht unerheblichen Anteil haben. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Finanzierung des Vorhabens „Untersuchung der Bildungsmechanismen der Fügezone beim Kollisionsschweißen“, aus dem zahlreiche Ergebnisse für diese Arbeit hervorgegangen sind.

Lebenslauf

Christian Pabst

29. Januar 1987, Berlin

1997-2006 Abschluss mit Abitur am Heinrich-Böll-Gymnasium in Ludwigshafen am Rhein

2006-2011 Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität Darmstadt

2011-2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, Technische Universität Darmstadt

seit 2011 Ingenieur im Bereich Forschung und Entwicklung bei der PSTproducts GmbH

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Danksagung	III
Lebenslauf	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen und Abkürzungen	IX
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
1 Einleitung	1
2 Wissensstand	3
2.1 Geschichte und Verfahrensgrundlagen	3
2.1.1 Sprengschweißen	5
2.1.2 Elektromagnetisches Pulsschweißen	7
2.2 Nomenklatur	10
2.3 Bekannte Einflussgrößen auf den Fügeprozess	11
2.3.1 Technologieunabhängige System- und Prozessparameter	12
2.3.2 Technologieabhängige System- und Prozessparameter	15
2.4 Prozessfenster	15
2.5 Kinetische Energie	17
2.6 Experimentelle Untersuchungen	18
2.7 Eigenschaften der Verbindung	22
2.7.1 Wellenförmige Zwischenschicht	22
2.7.2 Mechanische Eigenschaften	26
2.7.3 Metallurgische Eigenschaften	29
2.8 Prozessleuchten und Temperatur in der Fügezone	33

2.9	Numerische Simulation des Prozesses	34
2.10	Bestehende Hypothesen zur Verbindungsbildung	35
2.11	Zusammenfassung	37
3	Motivation, Zielsetzung und Vorgehen	39
3.1	Motivation und Zielsetzung	39
3.2	Einordnung dieser Arbeit	40
3.3	Fragestellungen und Arbeitshypothesen	41
3.4	Vorgehen	43
4	Versuchsaufbauten	45
4.1	Elektromagnetisches Pulsschweißen	45
4.2	Mechanischer Analogieversuch	47
4.2.1	Mechanischer Aufbau	47
4.2.2	Proben	48
4.2.3	Aufbau des Antriebs	48
4.2.4	Bewegungsablauf	50
4.2.5	Einhausung	51
4.2.6	Trigger für die Prozessbeobachtung	52
4.2.7	Vor- und Nachteile des Versuchsstands	53
4.3	Werkstoffe und Probenvorbereitung für die Versuche	55
4.4	Zusammenfassung	56
5	Methoden zur Prozessbeobachtung	57
5.1	Bildverstärkerkamera und Beleuchtungslaser	57
5.1.1	Funktionsweise der Kamera	57
5.1.2	Objektiv	59
5.1.3	Beleuchtungslaser	59
5.1.4	Beleuchtungsmodi	60
5.2	Quasistatische Prozessbeobachtung	62
5.3	Temperaturmessung nach dem Versuch	63

5.3.1	Durchführung und Berechnung	64
5.3.2	Berechnung des Energieeintrags.....	67
5.3.3	Korrekturen	68
5.3.4	Annahmen.....	71
5.3.5	Bewertung der Messmethode	74
5.4	Zusammenfassung	74
6	Auswertung des Energieeintrags	75
6.1	Abschätzung der Energiezufuhr im Analogieversuch.....	75
6.2	Vergleich von berechneter Energiezufuhr und Energieeintrag	77
6.3	Betrag der Temperaturerhöhung in der Fügezone.....	79
6.4	Energiebilanz bei der Verbundausbildung.....	82
6.5	Zusammenfassung	86
7	Ursachen der Energieerhöhung.....	87
7.1	Energieeintrag durch exotherme Oxidation von Aluminium	87
7.2	Energieeintrag durch plastische Deformation	95
7.3	Energieeintrag durch Kompression des Umgebungsmediums	98
7.4	Zusammenfassung	100
8	Auswirkungen und Beeinflussung des Energieeintrags.....	101
8.1	Wechselwirkung der Temperatur mit der Fügezone	101
8.2	Aktive Beeinflussung des Energieeintrags	106
8.3	Ursachen für das Prozessleuchten	106
8.4	Weitere Wechselwirkungen zwischen Umgebung und Prozess	109
8.5	Zusammenfassung	110
9	Beantwortung der Fragestellungen.....	111
10	Ausblick.....	113
11	Zusammenfassung.....	115
12	Zitierte Literaturstellen.....	117
12.1	Betreute studentische Arbeiten	117

12.2 Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung.....	117
12.3 Sonstige Literaturstellen.....	118
13 Glossar	133
14 Abbildungsverzeichnis	135
15 Tabellenverzeichnis	141
16 Danksagung.....	143

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen, lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a, f	K	Parameter
b, g	$\frac{1}{s}$	Parameter
B	H	Magnetfeld
c	$\frac{J}{kgK}$	spezifische Wärmekapazität
$E, \Delta E$	J	Energie, Energiedifferenz
E_{kin}	J	kinetische Energie
F_{mag}	N	magnetische Kraft
I_{Rohr}	A	Strom im Bauteil (hier ein Rohr)
I_{Spule}	A	Strom in der Werkzeugspule
λ	nm	Wellenlänge elektromagnetischer Wellen
m	kg	Masse
R_a	μm	Mittenrauwert
R_m	$\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$\frac{N}{mm^2}$	0,2 % Dehngrenze
t	s	Zeit
$T, \Delta T$	$^{\circ}C, K$	Temperatur, Temperaturdifferenz
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
v_c	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit des Kollisionspunktes

Formelzeichen, griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
β	°	Kollisionswinkel

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AA, Al	Aluminium
Cu	Kupfer
DIN EN	Deutsches Institut für Normung, Europäische Norm
EBSD	Electron backscatter diffraction (Elektronenrückstreubeugung)
EDX	energy dispersive X-ray spectroscopy (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)
EMPT	Elektromagnetische Pulstechnologie
EN AW	Euronorm Aluminium Knetlegierung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
H11	Kalt verfestigt, 1/8 hart (bei Aluminiumlegierungen)
H111	Geglüht und anschließend geringfügig kaltverfestigt, weniger als H11 (bei Aluminiumlegierungen)
H14	Kalt verfestigt, halbhart (bei Aluminiumlegierungen)
H18	Kalt verfestigt, voll hart (bei Aluminiumlegierungen)
HV	Härte nach Vickers
LDM	long distance microscope
PC	personal computer
px	Pixel (Bildpunkt)
REM	Rasterelektronenmikroskop
T6	lösungsgeglüht und warmausgehärtet (bei Aluminiumlegierungen)
TTL	Transistor-Transistor-Logik

Kurzfassung

Das Kernthema der Arbeit ist die Temperaturentwicklung in der Fügezone beim Kollisionsschweißen. Aus der Literaturrecherche geht hervor, dass das Verständnis dieses Verfahrens zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausreichend ist, um die Mechanismen ausreichend zu beschreiben und das Schweißergebnis vorherzusagen. Insbesondere der örtliche und zeitliche Temperaturverlauf in der Fügezone ist kaum bekannt.

Vor allem mithilfe von Experimenten mit dem elektromagnetischen Pulsschweißen und mit einem speziell für Grundlagenuntersuchungen entwickelten Versuchsstand werden die thermischen Effekte untersucht. Zum Einsatz kommt eine Wärmebildkamera, eine Bildverstärkerkamera sowie eine Spiegelreflexkamera, mit denen der eigentliche Fügevorgang beziehungsweise die Probe beobachtet werden. Die Temperaturentwicklung der Proben erlaubt einen Rückschluss auf deren Energiehaushalt und die Bildaufnahmen ermöglichen die Identifikation der zugehörigen physikalischen und chemischen Effekte. Zudem wird die Fügezone metallographisch untersucht.

Es zeigt sich dabei, dass in der Fügezone kurzzeitig Temperaturen bis über 1000 °C auftreten, womit sich das stängelförmige Gefüge in der Fügezone als Erstarrungsgefüge erklären lässt. Das Entstehen einer Verbindung ist energetisch nachweisbar. Darüber hinaus beeinflusst die Reaktivität des Umgebungsmediums durch die exotherme Reaktion mit dem Probenwerkstoff als zusätzliche Energiequelle die Temperatur der Fügezone und damit der gesamten Probe. Dies zeigt sich auch in der Ausdehnung des Erstarrungsgefüges in der Fügezone. Das charakteristische Prozessleuchten wird mit diesen Befunden ebenfalls erklärbar: Es entsteht hauptsächlich durch die plastische Deformation in der Fügezone sowie durch ausgestoßenes und verbrennendes Grundmaterial.

Abstract

The temperature development in the joining area of the collision welding process is the core topic of this thesis. From literature research it can be concluded that the understanding of the process is currently insufficient to describe the mechanisms adequately and predict the welding result sufficiently accurate. In particular, barely anything is known about the temporal and spatial temperature development in the joining area.

Primarily experiments will be used to investigate the thermal effects with the help of electromagnetic pulse welding and a test rig which is specially designed for the basic research of this process. A thermographic camera, an image intensifier camera and a single-lens reflex camera are used to observe and study the actual joining process as well as the samples. The energy budget of the samples can be deduced from their temperature development. The identification of the associated physical and chemical effects is enabled by the optical images. In addition, the joint area is examined metallographically.

The observations show that temperatures of up to more than 1000 °C occur in the joining area for a short time. Thus the columnar structure in the joint area can be explained as solidification structure. The development of a joint is energetically measurable. Furthermore, the temperature of the joint area and thus the temperature of the whole sample is influenced by the reactivity of the ambient medium with the sample's material, which is an additional source of energy. This effect also becomes apparent in the spatial extent of the solidification structure inside the joint area. The characteristic process light can be explained with the help of these findings, too: It mainly consists of glowing basic material due to the plastic deformation within the joining area as well as burning and expelled basic material.

1 Einleitung

Die stetige Fortentwicklung technischer Produkte verlangt vor allem in der Fertigung nach neuen Verfahren und Verfahrensvarianten, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Die Produktentwicklung wird dabei getrieben von der stärker werdenden Forderung nach einer möglichst geringen Ressourcennutzung, aber auch von den steigenden Endkundenansprüchen. Daneben stellt die Optimierung der Herstellungskosten einen weiteren treibenden Faktor dar.

Eine Herausforderung, die aus allen drei Kernforderungen resultiert, ist die vielfältige Multimaterialbauweise. Zur Steigerung der Ressourceneffizienz soll beispielsweise die Verwendung energieintensiver, seltener oder schwer wiederverwertbarer Werkstoffe auf den notwendigen Bereich in einem Bauteil oder einer Baugruppe beschränkt werden. Kundenforderungen beispielsweise nach Oberflächen von besonderer Güte bei gleichzeitig hoher Steifigkeit können es erforderlich machen, hier eine Funktionstrennung vorzunehmen. Aus Sicht der Kostenoptimierung sollte die Verwendung teurer Werkstoffe auf Bereiche im Produkt beschränkt werden, wo deren Eigenschaften unbedingt erforderlich sind.

Neben Verfahren mit Hilfselementen (beispielsweise Schrauben oder Nieten) und thermischen Fügeverfahren (beispielsweise Schmelzschweißen oder Schweißlöten) existiert die Verfahrensgruppe, in der die Verbindung über plastische Deformation der zu fügenden Bauteile erzielt wird. Hier ist eine weitere Unterscheidung nach Form- und Kraftschluss, beispielsweise Crimpen oder Clinchen, und Stoffschluss möglich. Beispiele für die stoffschlüssigen Verfahren durch plastische Deformation sind das Rührreibschweißen, das Pressschweißen, das Kaltfließpressschweißen und das Kollisionsschweißen. Der große Vorteil dieser Verfahrensgruppe ist, dass sie in aller Regel die Verbindung artungleicher¹ Metalle oder sogar unterschiedlicher Werkstoffe bei gleichzeitig hoher Verbundfestigkeit erlauben.

¹ (metallische) Werkstoffe mit nicht identischem Hauptlegierungsbestandteil, siehe Kapitel 13: Glossar

Eine große Herausforderung des stoffschlüssigen Fügens durch plastische Deformation ist die inhärente Interdisziplinarität. Neben den chemischen und auch thermischen Vorgängen spielt hier zusätzlich das plastische Umformverhalten der Fügepartner als mechanische Komponente eine große Rolle. Beim Kollisionsschweißen, das Gegenstand dieser Arbeit ist, kommt zusätzlich die Zeitskala hinzu: Bei Werkstückgeschwindigkeiten von mehreren hundert Metern pro Sekunde und lokalen Dehnraten bis über 10^6 $1/s$ ist das plastische Deformationsverhalten aus quasistatischen Untersuchungen nicht mehr gültig. Nicht zuletzt deshalb sind die wirksamen Mechanismen der Verbindungsbildung nicht abschließend geklärt. Als direkte Folge dessen kann die Prozess- und Fügestellenauslegung beim Kollisionsschweißen zum aktuellen Zeitpunkt fast ausschließlich nur empirisch vorgenommen werden.

Um ein Verfahren adäquat in der Fertigung einsetzen und seine Potentiale voll ausschöpfen zu können, müssen die auftretenden Effekte jedoch verstanden sein. Das Ziel dieser Arbeit besteht daher darin, weitere Mechanismen der Verbindungsbildung zu identifizieren und deren Wirkzusammenhänge bei der Ausbildung des Stoffschlusses zu untersuchen. Im Fokus stehen hierbei die thermischen Effekte, deren Ursache sowie die Auswirkungen auf die Verbindungseigenschaften. Dies soll einen Beitrag leisten, in Zukunft optimale Fügestellen zielgerichtet zu realisieren.

2 Wissensstand

2.1 Geschichte und Verfahrensgrundlagen

Das Kollisionsschweißen beruht im Wesentlichen darauf, dass die beiden Fügepartner bei hohen Relativgeschwindigkeiten von mehreren hundert Metern pro Sekunde unter einem definierten Winkel miteinander kollidieren [Dre01] [Gri04] [Zha10a]. Bei der gängigsten Konfiguration wird ein Fügepartner fixiert und der zweite auf die notwendige Geschwindigkeit beschleunigt. In der Literatur wird der stationäre Fügepartner üblicherweise als „Target“ oder „Parent“ bezeichnet, während der beschleunigte Fügepartner „Flyer“ genannt wird. Abbildung 2.1 zeigt idealisiert den Ablauf des Prozesses an einer einfachen Schweißkonfiguration mit zwei ebenen Fügepartnern. Der Flyer trifft mit der Normalgeschwindigkeit v im Winkel β auf das Target. Aus den geometrischen Randbedingungen ergibt sich, dass eine Kollisionsfront, oder bei dieser zweidimensionalen Betrachtung ein Kollisionspunkt, über die Oberflächen eilt, hier von rechts nach links. Die Geschwindigkeit v_c dieses Kollisionspunkts wird zusammen mit dem Kollisionswinkel β üblicherweise für das Prozessfenster einer bestimmten Werkstoffkombination herangezogen. Sie beträgt bei einer erfolgreichen Verbindung einige tausend Meter pro Sekunde, der Winkel liegt grob im Bereich zwischen 5 und 30 Grad. Unmittelbar am Kollisionspunkt herrschen geschätzte Dehnraten bis über 10^6 1/s bei Drücken von einigen Gigapascal [Akb05] [Ste14].

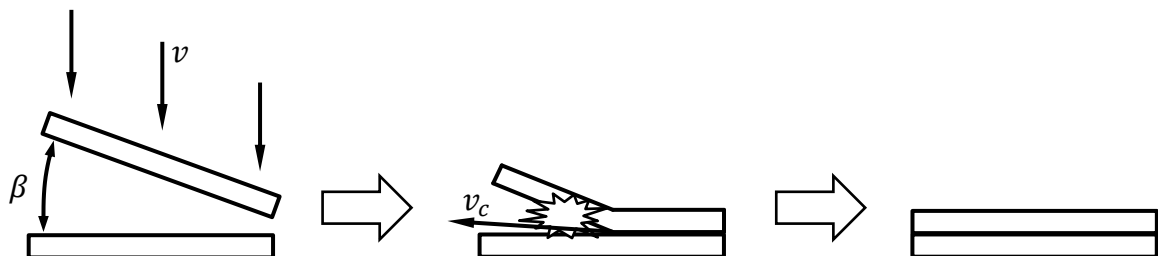


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung des Prozessablaufs beim Kollisionsschweißen.

Die Grundform des Verfahrens wurde während des ersten Weltkrieges entdeckt. Damals ist zufällig beobachtet worden, dass Granatsplitter eine starke Verbindung mit einer Panzerung eingegangen waren [Car75] [Cro82, S. 7]. Damit ist das Verfahren deutlich jünger als das Schmelzschweißen. Daraufhin ist das Sprengschweißen als erste Anwendung entwickelt worden [Car44]. Erst in den 1960er Jahren wurde das elektromagnetische Pulsschweißen zum Verschließen von Kernbrennstäben in der Sowjetunion genutzt [Dem92] [Kas10]. Die Verwendung von Druckwellen aus Explosionen zur Umformung in der Fertigung ist hingegen deutlich älter und lässt sich bis in das 19. Jahrhundert zurückverfolgen [ASM06].

In der Fertigung sind das Sprengschweißen und das elektromagnetische Pulsschweißen für das stoffschlüssige Verbinden von Metallen relevant. Beide werden bereits seit Jahrzehnten in der Praxis eingesetzt, allerdings in vergleichsweise geringem Umfang. Als Ursache können zum einen die verfahrensspezifischen Nachteile angenommen werden. So macht der Umgang mit den Sprengstoffen beim Sprengschweißen das Verfahren für die Serienfertigung unattraktiv. Die lange Zeit ungenügende Lebensdauer der Anlagen für das elektromagnetische Pulsschweißen war für dessen Verbreitung oftmals ein Hemmnis. Dies ist mittlerweile jedoch größtenteils ausgeräumt worden, da serientaugliche Anlagensysteme zur Verfügung stehen [Sch10]. Zum anderen bestehen Wissenslücken hinsichtlich der Fügemechanismen, was in den folgenden Kapiteln gezeigt wird.

Anders als beim Schmelzschweißen ist es mit dem Kollisionsschweißen problemlos möglich, selbst artungleiche Metalle stoffschlüssig zu fügen. Beispielhaft genannt seien hier Verbindungen von Aluminium mit Stahl [Aiz04], Aluminium mit Kupfer oder Silizium [Ale88] [Göb10] [Rao14], Titan mit (rostfreiem) Stahl [Man06] [Son11a], Titan mit Nickel [Chi04] und andere [Shr08] [Wat06]. Die Verbindungen besitzen im Falle einer artungleichen Metallpaarung kaum intermetallische Phasen. Selbst bei Verbindungen unter Beteiligung von Aluminium entsteht idealerweise kein Festigkeitsverlust durch den Fügevorgang. Bei korrekt eingestelltem Prozess ist die Fügezone² fester und auch zäher als der schwächere Fügepartner, wofür das ultrafeinkörnige Gefüge in diesem Bereich verantwortlich ist [Aiz07] [Ito16] [Shr69] [Viv13].

² Bereich zwischen den Fügepartnern, in der Regel nur wenige Mikrometer dick, siehe Kapitel 13: Glossar

2.1.1 Sprengschweißen

Beim Sprengschweißen sorgt die Druckwelle eines detonierenden Sprengstoffes für die Beschleunigung des Flyers. Beim Schweißen zweier ebener Bleche wird das Target auf einer Unterlage abgelegt. Im Abstand im Bereich von wenigen Millimetern bis Zentimetern darüber befindet sich der Flyer. Darauf wird der Sprengstoff verteilt, der von einer Stelle aus gezündet wird. Von diesem Zündpunkt aus bewegt sich die Detonationsfront je nach Sprengstofftyp mit mehreren tausend Metern pro Sekunde über den Flyer. Die Druckwelle beschleunigt den Flyer in Richtung Target, wodurch er eine plastische Deformation erfährt. Der Aufprall auf das Target erfolgt somit nicht flächig, sondern kontinuierlich mit der Geschwindigkeit v_c . Dadurch bildet sich der Winkel β , der essentiell für das Verfahren ist. Abbildung 2.2 illustriert diesen Vorgang als Momentaufnahme eines Querschnitts durch den Prozess. [ASM93] [Car75] [Cro82] [Shr69]

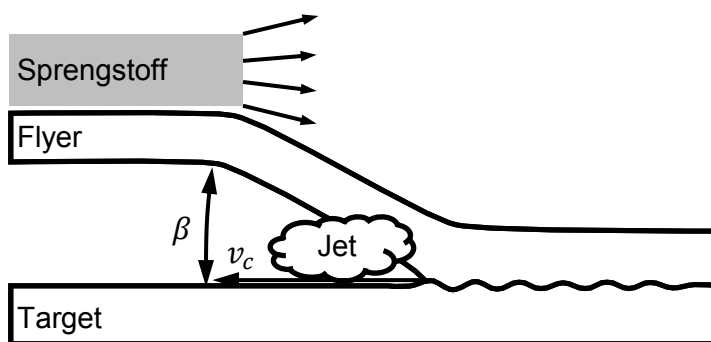


Abbildung 2.2 Schematische Darstellung des Sprengschweißens an einem Querschnitt durch den Prozess.

Über Art und Menge des Sprengstoffes sowie den Abstand der Fügepartner zueinander lassen sich der Winkel am Kollisionspunkt β sowie dessen Geschwindigkeit v_c einstellen [Car75] [Cow71]. Beide Prozessparameter sind annähernd konstant, abgesehen von den Bereichen an den Werkstückkanten. Damit ist ein flächiger Verbund mit homogener Verbindungszone realisierbar. Die Prozessfenster für bestimmte Werkstoffkombinationen werden beim Sprengschweißen üblicherweise in Abhängigkeit der beiden Größen v_c und β angegeben. Eine detailliertere Betrachtung dieses Prozessfensters erfolgt in Abschnitt 2.4.

Abbildung 2.3 zeigt außerdem den sogenannten „Jet“³. Dabei handelt es sich um oberflächennahes Grundmaterial beider Fügepartner, das während des Prozesses aufgrund des Materialflusses unter hoher Geschwindigkeit ausgestoßen wird. In der Literatur herrscht Konsens darüber, dass dieses sogenannte „Jetting“ für das Zustandekommen der Verbindung essentiell ist. Verbleibt dieses Material in der Fügezone, weil es prozessbedingt nicht ausgestoßen werden kann, verhindert es zumindest den vollflächigen Stoffschluss [Cro82, S. 86, S. 207].

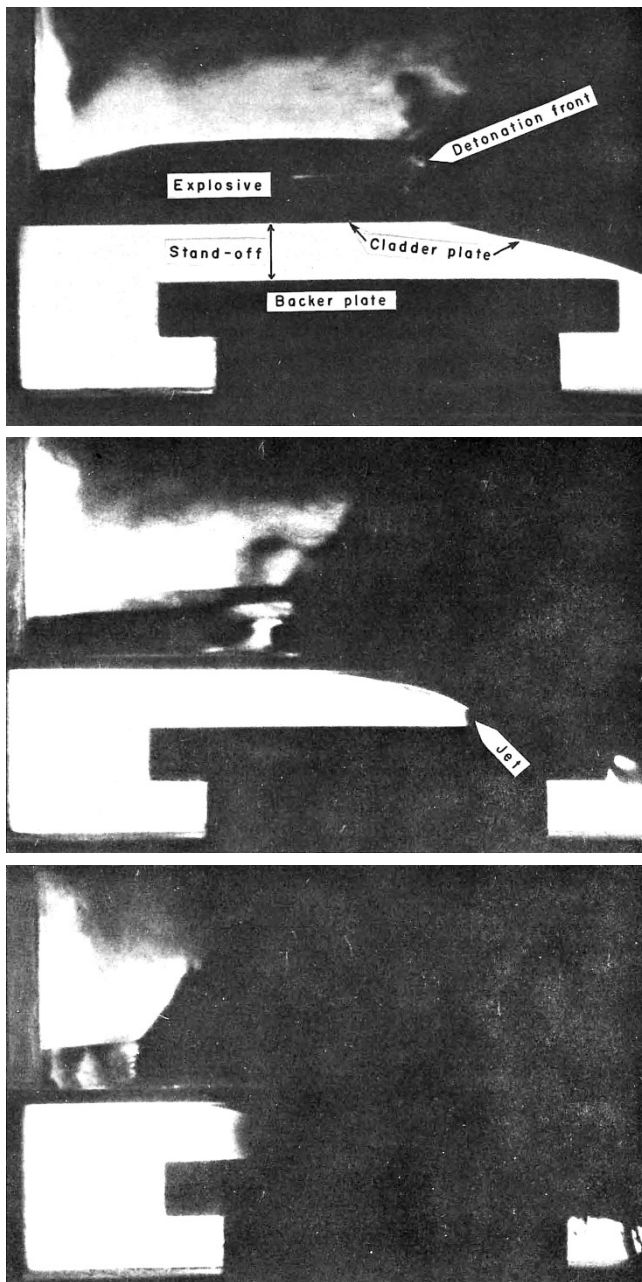


Abbildung 2.3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Sprengschweißen [Ber66].

³ Partikelstrom, der aus der Fügezone ausgestoßen wird, siehe Kapitel 13: Glossar

Da beim Sprengschweißen in aller Regel eine deutlich größere Energiemenge zur Verfügung steht als beim elektromagnetischen Pulsschweißen, sind großflächige Verbindungen eine häufige Anwendung. So werden beispielsweise die Wände von Spezialbehältern für die chemische Industrie auf diese Weise hergestellt [Car75]. Das Anwendungsgebiet ist jedoch deutlich weiter. Es umfasst thermisch und mechanisch hoch belastete Motorenkomponenten [Kol15] oder Baugruppen im Schiffsbau [Bui10]. Neben flachen und rohrförmigen Verbünden lassen sich vielfältige weitere Geometrien fügen.

2.1.2 Elektromagnetisches Pulsschweißen

Das elektromagnetische Pulsschweißen ist geometrisch ebenso flexibel. Die verfügbare Energie ist allerdings deutlich geringer als beim Sprengschweißen. Daher kann nur ein kleiner Bereich des Flyers zum Target gedrückt werden, weshalb in aller Regel nur linienförmige Verbindungen möglich sind. Die maximale Wanddicke des Flyers ist je nach Werkstoff mit wenigen Millimetern ebenfalls geringer. Darüber hinaus ist die elektrische Leitfähigkeit des Flyers limitierend, sodass beispielsweise rostfreie Stähle nicht ohne Hilfsmittel einsetzbar sind. Aufgrund der geringeren Energie, die dem Prozess nur während des Strommaximums für einige Mikrosekunden zur Verfügung steht, können ein konstanter Winkel β und eine konstante Geschwindigkeit des Kollisionspunkts v_c während der Kollision nicht kontinuierlich aufrecht erhalten werden. Der Prozess ist somit transient [Gro15**]. Dies hat zur Folge, dass nur ein Teil der Aufprallfläche einen Stoffschluss aufweist [Gro14**]. Die Mechanismen in der Fügezone sind allerdings mit dem Sprengschweißen identisch. Das elektromagnetische Pulsschweißen ist im Gegensatz zum Sprengschweißen jedoch für die Serienfertigung deutlich besser geeignet. Der Umgang mit gefährlichen Sprengstoffen entfällt und die Wiederholrate liegt im Bereich von nur wenigen Sekunden [Kal10]. Zudem sind die Anlagensysteme mittlerweile so weit entwickelt, dass sie den industriellen Anforderungen genügen [Sch10].

Ein Anlagensystem zum elektromagnetischen Pulsschweißen besteht immer aus einem Pulsgenerator und einer Werkzeugspule, die üblicherweise über spezielle Starkstromkabel miteinander verbunden sind. Der Pulsgenerator

wiederum besteht im Wesentlichen aus Kondensatoren, Hochstromschaltern und einer Hochspannungsquelle. Die Kondensatoren werden auf einen vorgegebenen Spannungswert geladen und im Anschluss über die Hochstromschalter durch die Werkzeugspule entladen. Dabei handelt es sich aus elektrischer Sicht um einen gedämpften Schwingkreis. Typische Kapazitäten liegen oft im Bereich von $10\text{ }\mu\text{F}$ bis $1000\text{ }\mu\text{F}$, die maximale Ladespannung beträgt je nach Typ zwischen 10 kV und 30 kV. Die in den Kondensatoren gespeicherte potentielle Energie beträgt je nach Ladespannung und Kapazität 5 kJ bis 100 kJ und darüber. Dabei ist zu beachten, dass anlagenabhängig davon nur ein kleiner Teil dem eigentlichen Fügeprozess zur Verfügung steht. Der größte Teil verlässt die Anlage als ohmsche Verluste.

Das Maximum der ersten Halbwelle des Entladestromes durch die Werkzeugspule reicht je nach Pulsgenerator von unter 100 kA bis über 1000 kA. Die Eigenfrequenz beträgt dabei unabhängig von der Ladespannung typischerweise 10 kHz bis 50 kHz. Je nach Anlagencharakteristik ist der oszillierende Strom nach drei oder auch mehr als zehn Schwingungen vollständig abgeklungen. Die Gesamtdauer der Entladung liegt somit oft unter einer Millisekunde. Bei der Prozessauslegung wird die Stromfrequenz als später unveränderlicher Parameter berücksichtigt und bei der Anlagenauswahl festgelegt. Sie bestimmt die Dauer des relevanten ersten Stromanstiegs und damit den zeitlichen Kraftverlauf auf den Flyer und dessen Beschleunigung. Zusammen mit der Geometrie und Position der Werkzeugspule wird darüber der Materialfluss des Flyers eingestellt. Daraus ergeben sich dann der Kollisionswinkel β und die Kollisionspunktgeschwindigkeit v_c . Beim Schweißen findet der Aufprall zeitlich im Bereich um das erste Strommaximum statt. In Abbildung 2.4 ist exemplarisch ein gemessener Stromverlauf des Systems dargestellt, das auch für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird. Es handelt sich um den Pulsgenerator „BlueWave PS32-16“ der Firma PSTproducts GmbH mit 32 kJ nominellem Energiespeichervermögen und 16 kV maximaler Ladespannung. Das Werkzeug ist eine Blechschweißspule für den Laborbetrieb mit einer effektiven Länge von 130 mm. Die Stromfrequenz dieses Systems beträgt etwa 18 kHz.

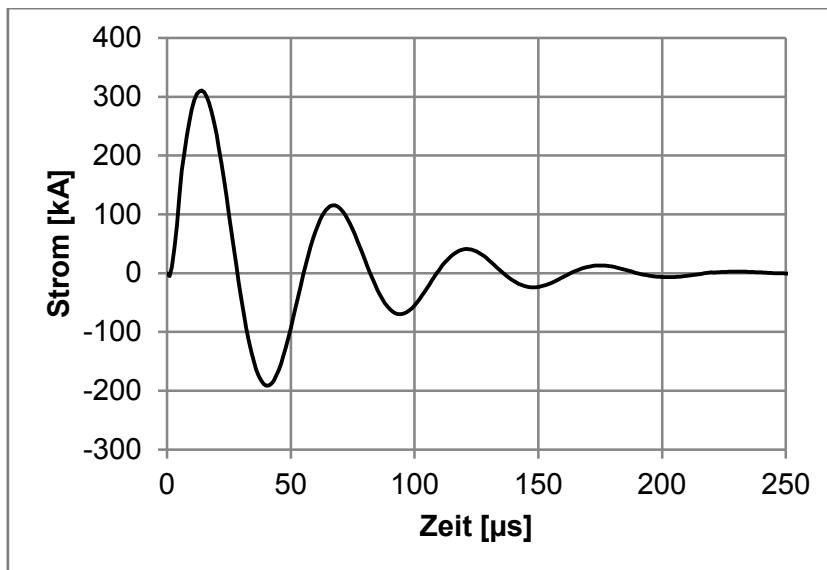


Abbildung 2.4 Beispielhafter, gemessener Stromverlauf an einem System bestehend aus Pulsgenerator und Blechschweißspule.

Die Werkzeugspule befindet sich nur durch eine dünne elektrische Isolation getrennt direkt am Flyer. In diesen induziert sie einen Wirbelstrom, der gemäß der Lenz'schen Regel entgegengesetzt läuft. Der Strom in der Werkzeugspule und der Wirbelstrom im Flyer stoßen sich daher mit der Lorentzkraft ab und der Flyer wird beschleunigt. Ihr Betrag ist stark vereinfacht gesprochen proportional zum Quadrat des Stroms. In Abbildung 2.5 ist die Induktion am Beispiel einer Kompressionsspule für rohrförmige Werkstücke illustriert. Der oszillierende Entladestrom I_{Spule} erzeugt das magnetische Wechselfeld B und induziert dadurch den entgegengesetzten Wirbelstrom I_{Rohr} im rohrförmigen Bauteil. Die abstoßende Kraft F_{mag} wird für den Prozess genutzt.

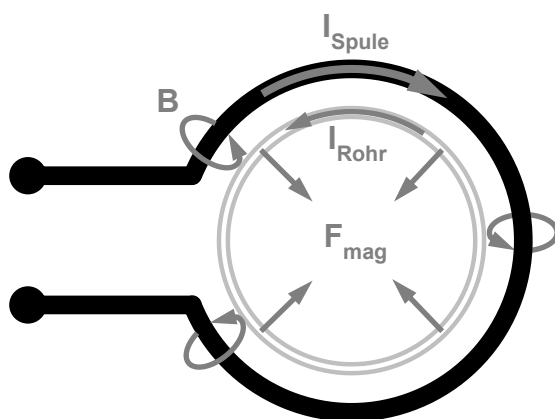


Abbildung 2.5 Schematische Darstellung der elektromagnetischen Induktion am Beispiel einer Kompressionsspule mit Rohr, nach [Kal10].

Auf die weiteren elektrodynamischen Grundlagen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da sie für den Inhalt dieser Arbeit und dessen Verständnis nicht relevant sind. Der elektrische Schwingkreis, bestehend aus Pulsgenerator, Werkzeugspule und Bauteil, gehorcht im Wesentlichen den elementaren Gesetzen der Elektrodynamik und lässt sich daher recht genau numerisch abbilden. Analytische Abschätzungen sind in vielen Fällen ebenfalls tragfähig.

2.2 Nomenklatur

In DIN EN 14610 werden die beschriebenen Verfahren Sprengschweißen und elektromagnetisches Pulsschweißen als „Schockschweißen“ bezeichnet. Dieser Begriff ist allerdings unpräzise, wie aus den Verfahrensgrundlagen in Abschnitt 2.1 hervorgeht. Allein durch einen Schock in den Fügepartnern lässt sich ein Stoffschluss nicht erzielen, es bedarf in jedem Fall des Aufpralls unter genau definierten Bedingungen. Daher wird in dieser Arbeit durchgängig der Begriff „Kollisionsschweißen“ verwendet. In der englischsprachigen Literatur wird üblicherweise von „impact welding“ geschrieben, was bei genauerer Interpretation die Grundlagen des Prozesses ebenfalls nicht exakt wiedergibt. Allgemein ist eine Kollision zwischen den Fügepartnern notwendig, es muss also eine Relativgeschwindigkeit bestehen. Der Aufprall („impact“) eines Fügepartners auf den zweiten stellt hingegen einen häufigen Sonderfall dar, bei dem einer der beiden Fügepartner stationär bleibt. Korrekter und allgemein gültig wäre hier also der Begriff „collision welding“.

Für das elektromagnetische Pulsschweißen sind in der Literatur mehrere Begriffe synonym in Verwendung, die in der Regel den Prozess ebenfalls nur ungenügend beschreiben. Der Begriff „Magnetimpulsschweißen“ (in manchen Quellen auch nur „Magnetpulsschweißen“), wie er in der DIN EN 14610 gebraucht wird, suggeriert die Ausnutzung magnetischer Effekte. Diese treten allerdings im Prozess in den Hintergrund. Tatsächlich relevant sind jedoch induzierte Wirbelströme im Bauteil und die Kräfte zwischen diesen, weshalb die elektrische Leitfähigkeit der wichtigste Parameter ist. Daher lassen sich nicht magnetisierbare Werkstoffe wie Aluminium oder Kupfer sehr gut beschleunigen und schweißen, wohingegen Stahl aufgrund der deutlich

geringeren elektrischen Leitfähigkeit immer herausfordernd ist. Streng genommen beruht das Verfahren also auf dem elektrodynamischen Prinzip, sodass „elektrodynamisches Pulsschweißen“ korrekt wäre. In der Literatur wird dieser Begriff jedoch nicht genutzt, daher wird in dieser Arbeit der Begriff „elektromagnetisches Pulsschweißen“ verwendet.

2.3 Bekannte Einflussgrößen auf den Fügeprozess

Zwei Arten von Prozessparametern sollen im Folgenden unterschieden werden. Die technologieunabhängigen Prozessparameter bestimmen direkt das Zustandekommen einer Verbindung und können daher für allgemeingültige Prozessfenster herangezogen werden. Wie der Aufprall erzeugt wird, ist dabei nicht von Belang. Die technologieabhängigen Parameter beeinflussen die Aufprallparameter hingegen lediglich indirekt über den Materialfluss und somit über die Materialeigenschaften. Sie bestimmen daher nur indirekt über das Zustandekommen der Verbindung. Eine Übersicht über die jeweils bekannten Parameter für das elektromagnetische Pulsschweißen und für das Sprengschweißen liefern Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7.

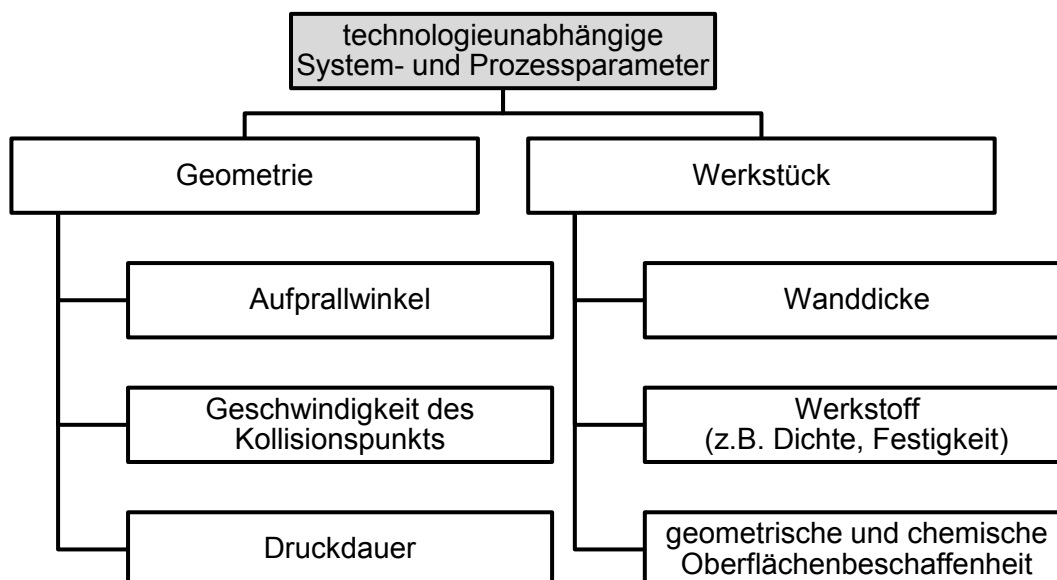


Abbildung 2.6 Systematische Übersicht über die technologieunabhängigen Parameter.

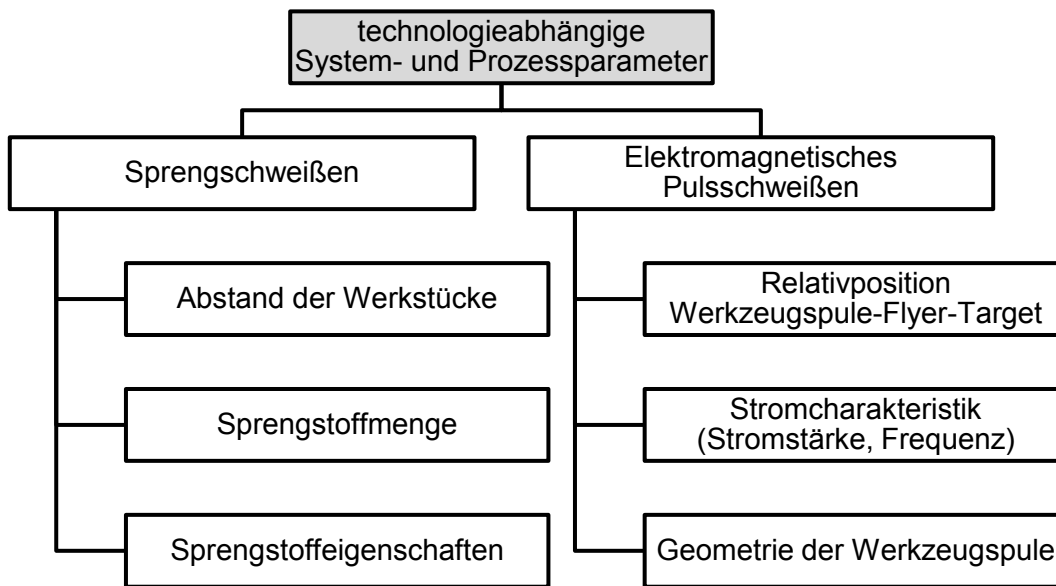


Abbildung 2.7 Systematische Übersicht über die technologieabhängigen Parameter.

2.3.1 Technologieunabhängige System- und Prozessparameter

Bei den technologieunabhängigen Prozessparametern lässt sich eine weitere Unterscheidung vornehmen in geometrische Bedingungen und Werkstückeigenschaften der Fügepartner.

Zu den geometrischen Bedingungen zählen die Geschwindigkeit des Kollisionspunktes v_c sowie der Winkel β zwischen den Fügepartnern an diesem Ort. Diese beiden Größen stellen üblicherweise die beiden Parameter für das Prozessfenster dar, da sie prozessunabhängig sind. Sie entscheiden maßgeblich darüber, ob die verbindungsbildenden Mechanismen aktiviert werden oder nicht. Das Prozessfenster wird in Abschnitt 2.4 näher erläutert. Zusätzlich wird die Dauer des beschleunigenden Drucks diskutiert [Lys12]. Dabei wird angenommen, dass eine längere Dauer zu einer besseren Verbindungsbildung beiträgt, indem der Druck auch noch nach dem erfolgten Aufprall für kurze Zeit fortbesteht. Hierbei wird die Analogie zu konventionellen Schweißverfahren gesucht, die sich durch unterschiedliche Anteile aus Zeit, Druck und Temperatur beschreiben lassen.

Die Werkstückeigenschaften werden vor allem bestimmt über die mechanischen Werkstoffeigenschaften sowie die chemischen und geometrischen Oberflächeneigenschaften. Im Folgenden sollen weiterhin

Oberfläche und Werkstoff der Fügepartner getrennt behandelt werden, da sie durch gezielte Vorbehandlungen auch getrennt voneinander eingestellt werden können und unterschiedlichen Einfluss auf den Fügeprozess haben. Bei den mechanischen Werkstoffeigenschaften und der Wanddicke handelt es sich streng genommen gleichzeitig um eine technologieabhängige Größe, da in eine mikroskopische⁴ und eine makroskopische Formänderung⁵ unterschieden werden kann (Abbildung 2.8).

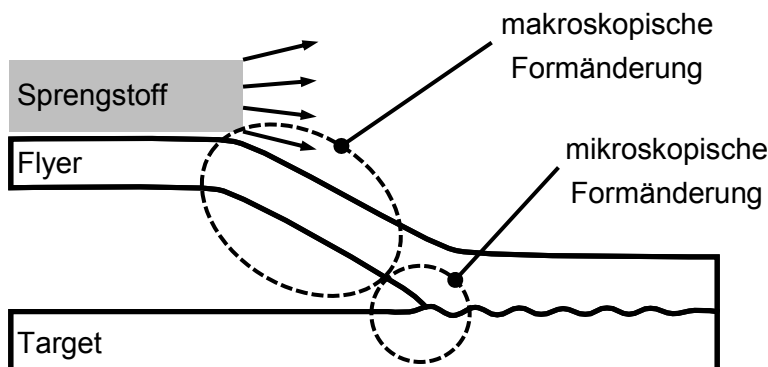


Abbildung 2.8 Makroskopische und mikroskopische Formänderung am Beispiel des Sprengschweißens.

Die mikroskopische Formänderung tritt in der Fügezone unter hohen Dehnungen und extrem hohen Dehnraten auf und ist technologieunabhängig, da alle Verfahren auf diesem Prinzip beruhen. Vor allem den industriell angewendeten Verfahren Sprengschweißen und elektromagnetisches Pulsschweißen ist zusätzlich gemein, dass mindestens ein Fügepartner während der Beschleunigung zusätzlich auf verschiedene Weise makroskopisch plastisch deformiert wird. Die dabei herrschenden Dehnungen sind ebenso wie die Dehnraten mit maximal etwa $5 \cdot 10^4$ 1/s um etwa zwei Größenordnungen geringer als in der Fügezone bei der mikroskopischen Deformation. Das Werkstoffverhalten bestimmt hier maßgeblich den Materialfluss und damit wiederum die Geometrie am Kollisionspunkt. Zu beachten ist dabei, dass (quasi-)statisch ermittelte Werkstoffkennwerte aufgrund der hohen Dehnraten in der Regel nicht aussagekräftig sind. Die Relevanz der Werkstoffdichte ist ebenfalls auf die hohen Geschwindigkeiten und die damit verbundenen Trägheitseffekte zurückzuführen.

⁴ Formänderung in der Größenordnung unter etwa $10 \mu\text{m}$, siehe Kapitel 13: Glossar

⁵ Formänderung in der Größenordnung über etwa $10 \mu\text{m}$, siehe Kapitel 13: Glossar

Die chemische Zusammensetzung der Oberfläche bestimmt, ob und wenn ja, unter welchen Parametern eine stoffschlüssige Verbindung möglich ist. Dazu zählen unbeabsichtigte Kontaminationen sowie beabsichtigte organische und anorganische beziehungsweise metallische Beschichtungen. Zusätzliche Beschichtungen, wie beispielsweise Konversionsschichten, Korrosion, Farben oder Öle sind für die Verbindung in aller Regel hinderlich, weshalb eine vorige mechanische oder chemische Reinigung durchgeführt wird. Metallische Beschichtungen hingegen können zu einer früher einsetzenden Verbindung führen [Bel16]. Die Oberflächenstruktur, hier vor allem die Rauigkeit sowie eine eventuell vorhandene Vorzugsrichtung bei gewalzten Halbzeugen, kann das Prozessfenster ebenfalls signifikant beeinflussen [Reb16a].

In der Literatur wird der vielfältige Einfluss der Wanddicke während der Kollision diskutiert, vor allem die des Flyers. Auf der einen Seite führt eine größere Dicke zu einer höheren kinetischen Energie bei gleicher Geschwindigkeit, wodurch beim Aufprall mehr Energie für die Verbindungsentstehung zur Verfügung steht [Ame87]. Ein weiterer Ansatz beruht darauf, dass die Ausbildung der Wellen in der Fügezone durch Schockwellen in den Fügepartnern ausgelöst wird [Ben10] [Jar87a]. Eine geänderte Dicke führt dabei zu kürzeren oder längeren Laufzeiten der Schockwelle und damit zu einer anderen Morphologie⁶ der Fügezone.

Auch die Wanddicke kann zugleich als technologieabhängiger Prozessparameter gezählt werden. Da die beiden industriellen Verfahren darauf beruhen, einen Flyer durch Aufbringen einer Kraft zu beschleunigen, führt eine größere Wanddicke und damit eine größere Masse zu einer Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit. Ohne Prozessanpassung, also eine Erhöhung der Energie, hat dies in der Regel also eine Verschlechterung der Verbindungseigenschaften zur Folge. Aufgrund des geänderten Verhältnisses zwischen Masse und Bauteilsteifigkeit ändert sich in jedem Fall der Materialfluss, während der Flyer den Beschleunigungsabstand überwindet.

⁶ Form, hier: Form der Fügezone, siehe Kapitel 13: Glossar

2.3.2 Technologieabhängige System- und Prozessparameter

Allen technologieabhängigen Parametern ist gemein, dass sie nur indirekt das Prozessfenster bestimmen. Die Verknüpfung stellt der Materialfluss über das Werkstoffverhalten dar. Nicht zuletzt aufgrund dessen komplexer Beschreibung unter den herrschenden Bedingungen ist die Wirkung der technologieabhängigen Größen nach aktuellem Kenntnisstand nicht vollständig vorhersagbar. Bei Variation eines einzigen Verfahrensparameters ändern sich in der Regel Kollisionswinkel, Kollisionspunktgeschwindigkeit und Druckdauer gleichzeitig.

Dem elektromagnetischen Pulsschweißen und dem Sprengschweißen ist der Beschleunigungsabstand als Einflussgröße gemein. Darüber kann nicht nur die Aufprallgeschwindigkeit variiert werden, sondern auch der Aufprallwinkel. Sie lassen sich daher aber nicht unabhängig voneinander einstellen.

Die Stromcharakteristik beim elektromagnetischen Pulsschweißen spielt ebenfalls eine große Rolle. Vereinfacht ausgedrückt bestimmen Frequenz und Stromstärke die Steilheit des Kraftanstiegs und den Betrag der Kraft. Damit wird der Materialfluss verändert. Beim Sprengschweißen entspricht dies in etwa den Sprengstoffeigenschaften, wie beispielsweise der Brisanz⁷. Hier ist zudem die Menge des Sprengstoffs eine wichtige Größe [Car75].

Beim elektromagnetischen Pulsschweißen kann zudem die räumliche Verteilung des elektromagnetischen Drucks über die Geometrie der Werkzeugspule sowie deren Relativposition zum Flyer eingestellt werden.

2.4 Prozessfenster

Vom Sprengschweißen sind zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich Werkstoffkombinationen und Prozessparameter vorhanden. Es ist nicht nur das ältere Verfahren und damit häufiger Untersuchungsgegenstand. Aufgrund der potentiell höheren zur Verfügung stehenden Energie und der fehlenden Forderung nach guter elektrischer Leitfähigkeit sind zudem ungleich mehr Werkstoffkombinationen schweißbar.

⁷ Zertrümmerungsvermögen eines explosiven Stoffes, siehe Kapitel 13: Glossar

Beim Sprengschweißen wird das Prozessfenster üblicherweise in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Kollisionspunktes v_c und dem Winkel β an dieser Stelle angegeben. Ein qualitatives Prozessfenster ist in Abbildung 2.9 gezeigt.

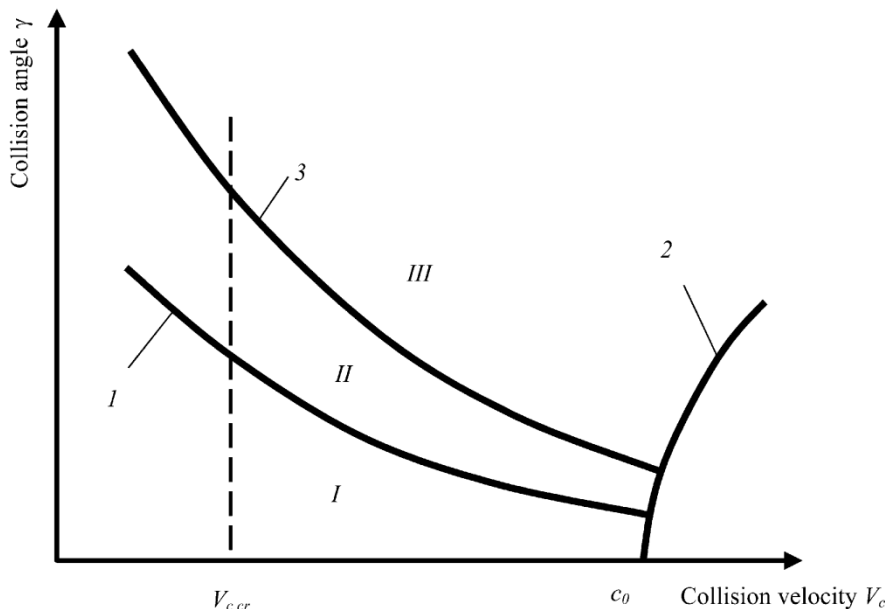


Abbildung 2.9 Qualitatives Prozessfenster [Lys12].

Im Prozessfenster lassen sich verschiedene Bereiche und Grenzen auftragen und interpretieren. Der Bereich II kennzeichnet den Bereich, in dem eine Verbindung möglich ist. Die beiden oben (3) und unten (1) begrenzenden, hyperbolischen Linien entsprechen zwei Energieniveaus beim Aufprall. Darunter in Bereich I ist die Energie zu gering, sodass keine Verbindung zustande kommen kann. Darüber in Bereich III ist die Energie zu hoch, sodass großflächiges Aufschmelzen auftritt und die Verbindungseigenschaften ungünstig beeinflusst werden oder gar keine Verbindung erzeugt wird. Linie 2 kennzeichnet eine weitere, obere Prozessgrenze, ab der keine Verbindung mehr möglich ist. Dabei handelt es sich um die niedrigere Schallgeschwindigkeit der beiden Fügepartner. Ab dieser Geschwindigkeit kann der Jet nicht mehr dem sich schließenden Spalt entkommen und verbleibt zwischen den Fügepartnern, sodass der Stoffschluss verhindert wird. Die senkrechte, gestrichelte Linie bezeichnet den theoretischen Übergang von einer ebenen (links davon) zu einer welligen (rechts davon) Grenzfläche. Versuche zeigen, dass ihr Verlauf in der Realität wahrscheinlich ebenfalls leicht hyperbolisch ist [Cro82, S. 100].

Vollständige, quantitative Prozessfenster sind allerdings kaum vorhanden. Selbst dabei handelt es sich in aller Regel um theoretisch berechnete Werte, da die Messung aufgrund der hohen Geschwindigkeiten und des Sprengstoffes sehr aufwändig ist. Ein solches Prozessfenster findet sich beispielsweise in [Car75] oder [Gri04]. Der Bereich für den Aufprallwinkel liegt etwa im Bereich zwischen 5° und 30° [Akb09] [Bah67] [Lys12] [Man06] [Pru77]. Die Aufprallgeschwindigkeit liegt im Bereich ab etwa 250 m/s bis über 600 m/s [Akb05] [Lys12] [Viv14] [Zha10a].

Den zahlreichen Einflussfaktoren auf den Prozess ist geschuldet, dass noch weitere Darstellungsformen existieren. Dabei werden Systemparameter wie beispielsweise die Ladespannung beim elektromagnetischen Pulsschweißen und Abstand der Werkstücke [Rao13], die Aufprallgeschwindigkeit in Normalrichtung [Jar87b] oder die Dicke von Flyer oder Target aufgetragen [Els10]. Zusätzlich wird, in Anlehnung an das Schmelzschweißen, die Druckdauer nach dem Aufprall als dritter Parameter diskutiert [Lys12].

2.5 Kinetische Energie

Die kinetische Energie ist bei der Verfahrensgruppe von zentraler Bedeutung und wird daher oft zur Charakterisierung herangezogen. Im Folgenden soll hier unterschieden werden zwischen der makroskopisch und der mikroskopisch relevanten kinetischen Energie. Die makroskopisch relevante kinetische Energie soll dabei die globale kinetische Energie der Fügepartner bezeichnen. Sie ist damit also direkt abhängig von den beteiligten Massen und ihrer Geschwindigkeit, wobei es sich in aller Regel um die Aufprallgeschwindigkeit des Flyers handelt. Über den Sprengstoff beziehungsweise den Entladestrom beim elektromagnetischen Pulsschweißen kann diese Energie direkt beeinflusst werden. Daher ist sie vergleichsweise einfach zu ermitteln.

Die mikroskopisch relevante kinetische Energie hingegen bezeichnet lediglich den Anteil, der um den Bereich des Kollisionspunkts und der Jetbildung auftritt. Sie ist zwar geringer als die makroskopische Energie, kann jedoch als mitbestimmende Größe für den Prozess angesehen werden. Wie aus Abschnitt 2.4 hervorgeht, entspricht eine Vergrößerung des Kollisionswinkels

oder der Kollisionspunktgeschwindigkeit einer Erhöhung der kinetischen Energie am Kollisionspunkt. Gleiche Energieniveaus lassen sich also als Hyperbeln im Prozessfenster darstellen, wie Abbildung 2.10 illustriert. Je weiter sich ein Prozess in Richtung höherer Energie bewegt, desto ausgeprägter werden beispielsweise die intermetallischen Phasen bei artungleichen Kombinationen, die in Abschnitt 2.7.3 gezeigt werden.

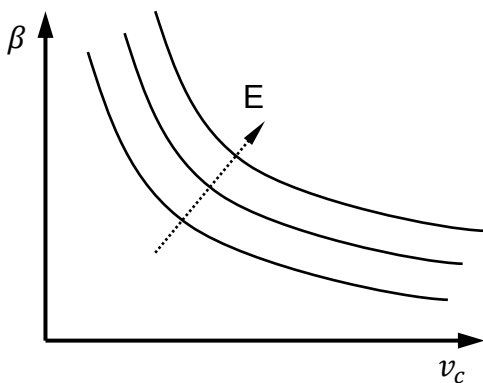


Abbildung 2.10 Lage konstanter Energieniveaus im Prozessfenster.

Je nach Verfahren besteht eine mehr oder weniger enge Korrelation zwischen den beiden kinetischen Energien. Die mikroskopisch relevante kinetische Energie wird nur indirekt über die makroskopisch relevante Energie beeinflusst. Verknüpfender Faktor ist der makroskopische Materialfluss. Da die Fügezone eine unterschiedliche Fläche beziehungsweise Länge aufweisen kann, verteilt sich die Energie. Bei transienten Prozessen wie dem elektromagnetischen Pulsschweißen muss dies berücksichtigt werden, wenn von Energien gesprochen wird. Hier wäre streng genommen die Einführung einer Energiedichte sinnvoll, die allerdings noch schwerer zu erfassen ist.

2.6 Experimentelle Untersuchungen

In der Vergangenheit sind zahlreiche Untersuchungen publiziert worden, bei denen jedoch lediglich die technologieabhängigen Prozessparameter systematisch variiert werden konnten. Eine Rückführung auf die prozessunabhängigen Prozessparameter, die eine Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglichen, kann damit nicht stattfinden. In der Literatur lassen sich im Wesentlichen drei Prozesse unterscheiden: Das Sprengschweißen, das elektromagnetische Pulsschweißen sowie Versuche mit Projektilen.

Beim Sprengschweißen wird zum einen der Sprengstoff in Art und Menge variiert [Akb09] [Cow71] [Der67] [Ger00] [Gul08] [Kah05] [Men13] [Zam12]. Daneben wird die Wanddicke der Fügepartner verändert, um Effekte von Schockwellen in der Dickenrichtung zu identifizieren [Jar87] oder die kinetische Energie und den Materialfluss zu beeinflussen [Man06]. Die Form des Targets wird mit dem Ziel modifiziert, den Aufprallwinkel zu variieren [Bah67] [Gri04] [Kow71]. Daneben ist der Abstand der Fügepartner ein Parameter, mit dem Geschwindigkeit und Winkel eingestellt werden können [Akb09]. In einigen Konfigurationen wird der Winkel zwischen den Fügepartnern auch direkt eingestellt, indem beispielsweise zwei Platten zueinander ausgerichtet werden [Der68]. Konkrete Messungen der Kollisionspunktgeschwindigkeit und des Winkels werden selten durchgeführt, beispielsweise in [Ber66] und [Dre01]. In den meisten Fällen werden Annahmen und analytische Berechnungen herangezogen.

Beim elektromagnetischen Pulsschweißen wird die Geometrie des wirksamen Bereichs der Werkzeugspule variiert [Aiz04] [Kor08] [Zha10a] oder auch die Relativposition von Werkzeugspule zu Flyer [Fae10] [Wat09] [YuF14]. Häufigster und auch in der Regel am einfachsten zugänglicher Parameter ist die Ladeenergie des Pulsgenerators. Sie wird meist zusammen mit dem Beschleunigungsabstand variiert [Els10b] [Kor07] [Oka04] [Oli14] [Rao13] [Wat06]. Ähnlich wie beim Sprengschweißen werden zusätzlich beim Rohrschweißen der Winkel zwischen außenliegendem Rohr und innenliegendem Dorn [McG09] sowie die Wanddicke [Lue16] [Shi14] variiert.

Des Weiteren sind Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenrauigkeit [Gey12] [Gey14] [McG09] und von metallischen Beschichtungen [Bel16] durchgeführt worden. Außer ebenen und rohrförmigen Schweißungen werden auch an dem Punktschweißen entlehnten Geometrien Schweißversuche durchgeführt [Man14].

Beim elektromagnetischen Pulsschweißen beschränkt sich die In-situ-Messung ebenfalls auf nur wenige bildgebende Verfahren mit Hochgeschwindigkeitskameras [Kas10] [Kos08] [Wat09], wobei die Qualität der Aufnahmen keine belastbaren Messungen der Geschwindigkeiten und Winkel oder Interpretationen mikroskopischer Effekte erlaubt, wie Abbildung 2.11 beispielhaft zeigt.

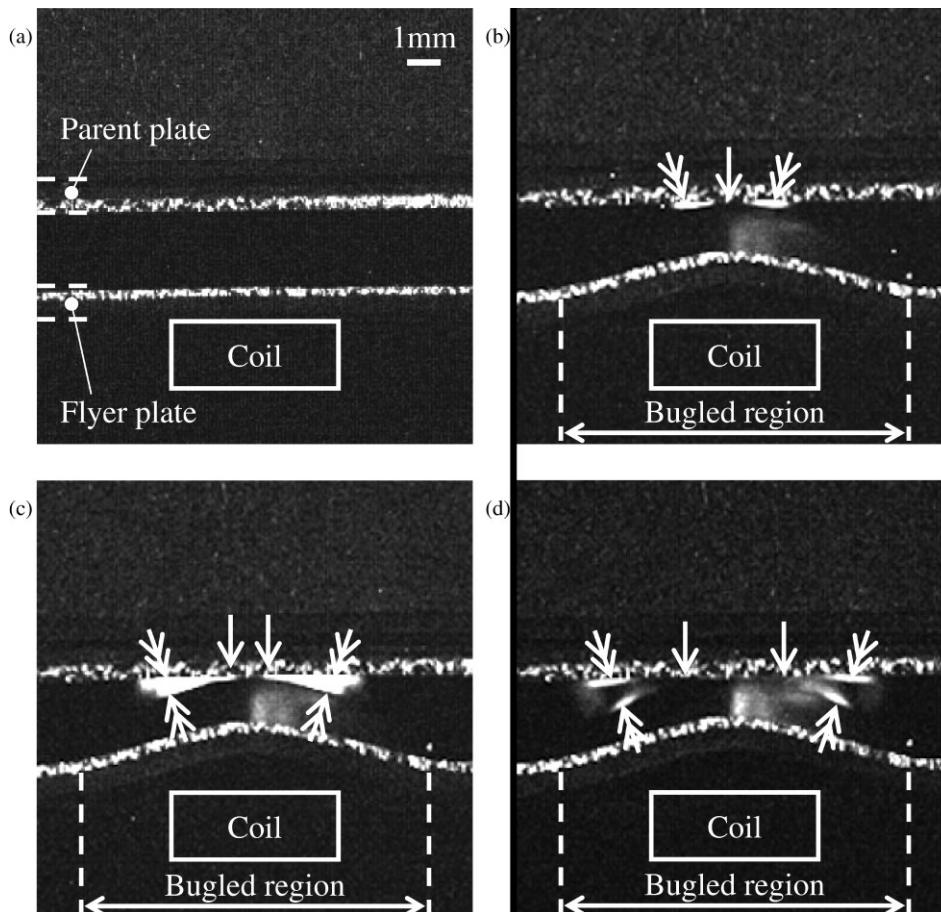


Abbildung 2.11 Bildsequenz von elektromagnetischen Pulsschweißen von Blech [Wat09].

Daneben werden Versuche durchgeführt mittels Photon Doppler velocimetry (PDV), bei denen die Geschwindigkeit des Flyers zeitlich hoch aufgelöst gemessen wird [Cuq14] [Lue16] [Nas15] [Viv16]. Nachteilig hierbei ist, dass nur die Geschwindigkeit weniger Punkte oder gar nur eines Punktes gemessen werden kann. Daraus lassen sich mikroskopische Effekte wie beispielsweise die Jetbildung oder der Kollisionswinkel nicht ermitteln. Überdies ist die Ermittlung der Geschwindigkeit aus den Rohdaten vergleichsweise aufwändig.

Zusätzlich zu Untersuchungen am Sprengschweißen oder dem elektromagnetischen Pulsschweißen existieren wenige eigene Versuchsaufbauten, die mit dem Ziel entworfen worden sind, stabile Bedingungen zu gewährleisten. Sie setzen alle auf ein Projektil, das mit einer Schusswaffe unter definiertem Winkel auf das Target beschleunigt wird [Akb05] [HeS16] [Tur95]. In den Veröffentlichungen findet allerdings neben den metallographischen Schliffen keine Beobachtung des Prozesses statt.

Zum Schweißen unter Vakuumbedingungen existieren nur wenige Veröffentlichungen. Sie kommen zu drei unterschiedlichen Ergebnissen. Nach [Ber66] führt das Sprengschweißen im Vakuum zu keiner Verbesserung der optischen und mechanischen Fügezoneigenschaften, obgleich der Jet hier annähernd doppelt so schnell gemessen wird. Nach [Gro87] ist beim Sprengschweißen die Aufprallgeschwindigkeit im Vakuum mehr als doppelt so hoch wie in Luft, und auch die mechanischen Eigenschaften der Fügezone verbessern sich. Nach [Bui10] werden beim Sprengschweißen im Vakuum ebenfalls bessere Eigenschaften der Verbindung erreicht, allerdings liegt keine deutlich höhere Aufprallgeschwindigkeit zugrunde. Eine gleich gute Verbindung wie in Luft wird im Vakuum mit weniger Sprengstoff erreicht. Die gleiche Menge würde zu einer größeren Wellenamplitude und dadurch schlechteren Ergebnissen führen. Aktuelle experimentelle Untersuchungen zum Einfluss anderer Umgebungsmedien in [Pab16b**] und [Pab18**] zeigen, dass die Kollisionsgeschwindigkeit im Vakuum nahezu unverändert bleibt. Die Geschwindigkeit des Jets ist hingegen fast doppelt so hoch wie in [Ber66] bei einer gleichzeitig signifikanten Verbesserung der Eigenschaften der Fügezone wie in [Bui10].

Allen Publikationen ist gemein, dass die tatsächlich herrschenden, technologieunabhängigen Parameter kaum oder gar nicht betrachtet werden. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse nicht vergleichbar sind und nach wie vor keine gezielte Prozessentwicklung ermöglichen. Die Werkstoffe, die Oberflächen, die Anlagenparameter und die Untersuchungsmethoden sind unterschiedlich. Gegenstand der Untersuchungen sind zudem in fast allen Arbeiten die metallographische Auswertung der Fügezone, Zugversuche zur Ermittlung der Festigkeit oder die Prüfung der Leckrate. Die Ergebnisse lassen Fragen zu den eigentlichen Mechanismen unbeantwortet. Daher existiert eine Vielzahl an Interpretationen der Ergebnisse und Theorien zu den Mechanismen.

Der eigentliche Fügeprozess, der innerhalb weniger Mikrosekunden abläuft, wird in allen Untersuchungen als eine „Black Box“⁸ behandelt, da die Wirkzusammenhänge nicht bekannt sind. Es existieren nur Theorien, von denen die gängigsten in Abschnitt 2.10 erläutert werden. Diese „Black Box“

⁸ System, das eine unbekannte Verknüpfung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen aufweist, siehe Kapitel 13: Glossar

repräsentiert den Prozess und verknüpft die bekannten Parameter mit den Verbindungseigenschaften. Selbst um diese Verknüpfungen in einem ersten Schritt ohne Kenntnis der Wirkzusammenhänge zu beschreiben, ist eine möglichst getrennte Untersuchung der einzelnen Parameter notwendig, zumindest jedoch eine umfassende Versuchsdurchführung und systematische Auswertung. Dies hat bislang jedoch nicht im erforderlichen Umfang stattgefunden, was vor allem auf die erwähnte Abhängigkeit der Parameter untereinander in den Realprozessen zurückzuführen ist. So ist es beispielsweise beim elektromagnetischen Pulsschweißen nicht möglich, den Aufprallwinkel und die Kollisionspunktgeschwindigkeit vollständig voneinander getrennt zu variieren.

Die (optische) Prozessbeobachtung, mit deren Hilfe sich zahlreiche Phänomene untersuchen lassen, hat nur in begrenztem Maßstab stattgefunden. Ursächlich dafür ist beim Sprengschweißen der Sprengstoff, sodass hier nur makroskopische Aufnahmen existieren. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen erlauben die oftmals veralteten Anlagen keine zeitlich exakte Auslösung der Kameras. Ursächlich dafür sind starke Streuungen bei der Verzögerung zwischen dem Zündsignal und dem Beginn der Entladung der Kondensatoren. Zudem erfordern die kurzen Zeitskalen spezielle Systeme, um den innerhalb weniger Mikrosekunden ablaufenden Prozess ausreichend hoch zeitlich und örtlich auflösen zu können.

2.7 Eigenschaften der Verbindung

Stoffschlüssige Verbindungen, die durch das Kollisionsschweißen hergestellt worden sind, besitzen charakteristische Eigenschaften, die sich teilweise erheblich von denen anderer Fügeverfahren abheben.

2.7.1 Wellenförmige Zwischenschicht

Die wohl markanteste Eigenschaft der Fügezone ist, dass sie im Querschnitt in aller Regel eine wellenförmige Gestalt aufweist. Charakteristische Mikroskopaufnahmen sind beispielsweise zu finden in [Bah67], [Car04], [Cow71], [Rao14] und [Viv14]. Abbildung 2.12 zeigt exemplarisch die Fügezone zwischen Rohr und Bolzen aus EN AW-6061 T6 im Querschnitt.

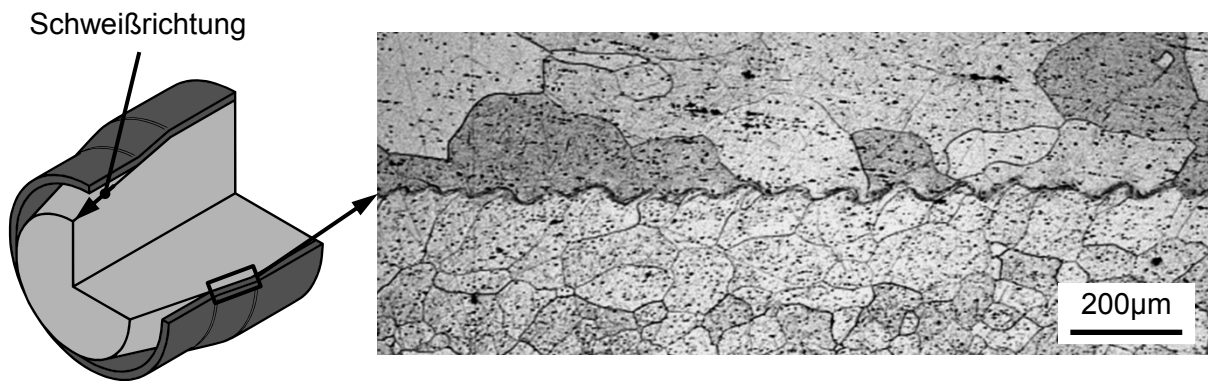


Abbildung 2.12 Beispielhafte Darstellung der wellenförmigen Fügezone bei der artgleichen⁹ Verbindung von EN AW-6061 T6 [Els10].

Wellenlänge und Amplitude sind durch den Prozess sowie die Materialpaarung bestimmt und befinden sich im Bereich von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Millimetern. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen treten Amplituden und Wellenlängen im Submillimeterbereich auf, wohingegen sie beim Sprengschweißen eher darüber liegen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Fügepartner hier oftmals dicker sind und auch größere Winkel eingestellt werden bei gleichzeitig ähnlichen Kollisionspunktgeschwindigkeiten. Dadurch ist die zur Verfügung stehende kinetische Energie höher und ausgeprägte Wellen können gebildet werden. Bei entsprechenden Parametern, in der Regel bei kleinen Kollisionswinkeln, werden auch ebene Verbünde ohne jede Welligkeit beobachtet [Göb10].

Hinsichtlich der Initiierung der Wellen werden zwei Ansätze kontrovers diskutiert: fluidische Effekte und Schockwellen.

Aufgrund der Morphologie, die Wellen in Flüssigkeiten sehr ähnelt, ist der fluidische Ansatz unmittelbar nachvollziehbar. Direkt in der Nähe des Kollisionspunktes herrschen geschätzte Dehnraten im Bereich um 10^6 1/s. Bei den notwendigen Materialgeschwindigkeiten treten hohe Trägheitskräfte auf, die verglichen mit den Umformkräften signifikant sein können. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, den Festkörper in diesem Bereich wie eine Flüssigkeit zu beschreiben [Pel18]. In der Literatur wird daher beispielsweise in Anlehnung an die Strömungsmechanik eine Reynoldszahl definiert. Sie ist hier der Quotient aus dem Produkt von Dichte und Geschwindigkeit und der Härte, wobei für letztere auch die Zugfestigkeit verwendet wird. Die

⁹ (metallische) Werkstoffe mit identischem Hauptlegierungsbestandteil, siehe Kapitel 13: Glossar

Ausformung der Wellen wird in der Literatur oft mit dem Analogon zweier ineinander fließender Strömungen beschrieben, die Flyer und Target darstellen. Deren Dichte, die Geschwindigkeit, die Viskosität sowie der Winkel dominieren Wellenlänge und Amplitude [Car75] [Cow71] [Gro87] [Lys12]. Für die Initiierung der Wellen werden innerhalb dieses Ansatzes zwei Theorien diskutiert: die Kelvin-Helmholtz Instabilität und die Kármánsche Wirbelstraße. Die Kelvin-Helmholtz Instabilität tritt ab einer kritischen Reynoldszahl auf. Damit lässt sich auch erklären, warum die charakteristische wellenförmige Struktur vor allem beim elektromagnetischen Pulsschweißen, das tendenziell bei geringeren Energien abläuft als das Sprengschweißen, nicht immer zu beobachten ist. Die Kármánsche Wirbelstraße hinter einem Hindernis ist in [Pai06] anschaulich experimentell untersucht worden. Eine eingebrachte Störung in Form eines Drahtes parallel zur Kollisionsfront führt bei hoher Reynoldszahl zu einer verstärkten Wellenbildung, wohingegen bei einer geringeren Reynoldszahl eine Stabilisierung eintritt (Abbildung 2.13).

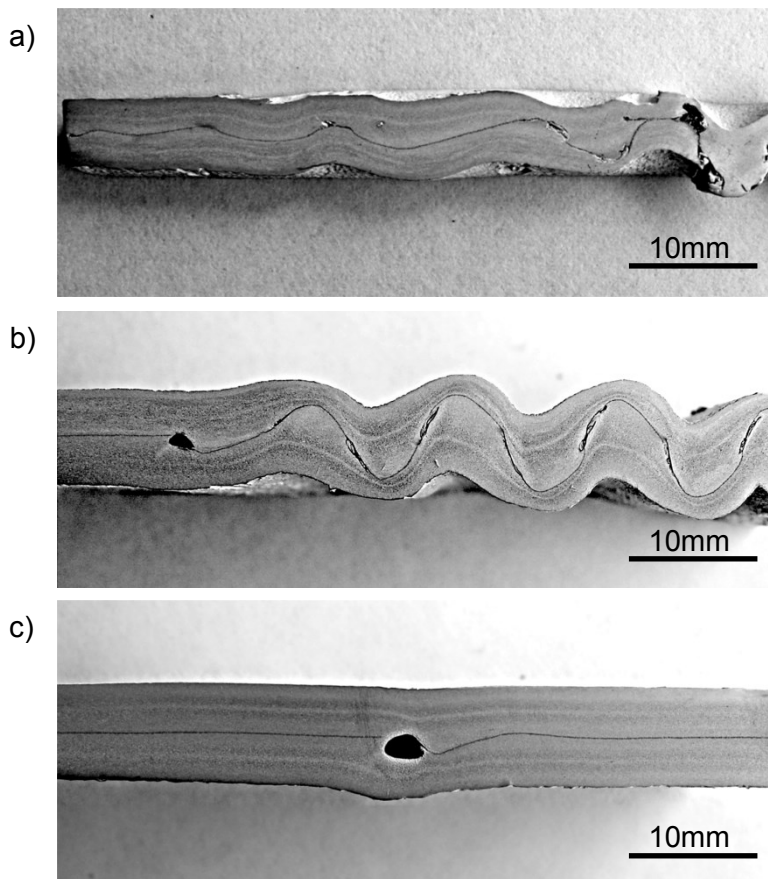


Abbildung 2.13 Wellenbildung ohne Störung (a), forcierte Wellenbildung durch eingebrachte Störung bei identischer Reynoldszahl (b) und Stabilisierung bei niedrigerer Reynoldszahl (c) [Pai06].

In der zweiten Theorie wird davon ausgegangen, dass Schockwellen, die durch den Aufprall in den beiden Fügepartnern laufen, die Störung zur Initiierung der Wellenbildung darstellen [Ben10] [Jar87a]. Abbildung 2.14 zeigt schematisch dieses Konzept. Vom ersten Kontaktpunkt ausgehend laufen diese Druckschockwellen in Dickenrichtung durch die Fügepartner (a), werden an deren Rückseite reflektiert (b) und erreichen wieder die Fügezone (c), allerdings aufgrund der Reflektion als Zugschockwelle. Dort sorgt die damit einhergehende Bewegung der Oberfläche für die Störung des Materialflusses und löst so die Wellenentstehung aus (d).

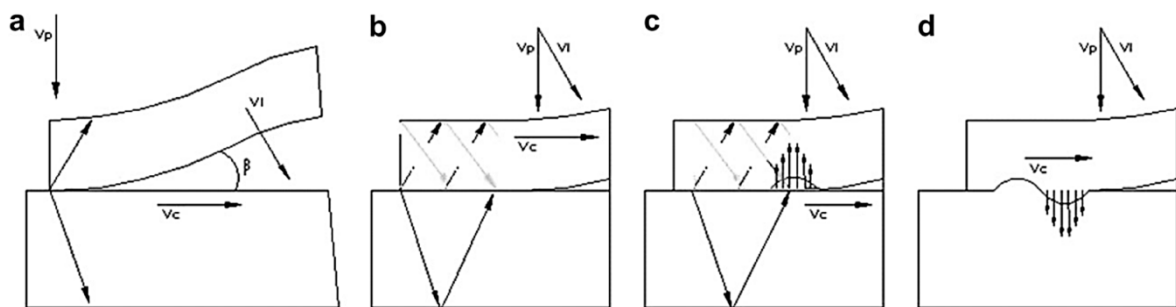


Abbildung 2.14 Welleninitiierung durch Schockeffekte [Ben10].

Allen Untersuchungen ist gemein, dass die Mechanismen nicht ausreichend voneinander getrennt werden können. Die Untersuchungen zu den Schockwellen als Auslöser in [Ben10] und [Jar87a] durch Targets mit unterschiedlichen Wanddicken und damit unterschiedlichen Laufzeiten der Schockwellen führen zwangsläufig zu unterschiedlichen Nachgiebigkeiten des Targets. Es wird während des Prozesses unterschiedlich plastisch deformiert, was dazu führt, dass sich der Winkel während der Kollision ändern kann. Die Versuche mit Flüssigkeiten zu den hydrodynamischen Ansätzen können nicht berücksichtigen, dass nur ein geringer Teil des Werkstückvolumens an der Oberfläche diese Dehnraten erfährt und daher als Fluid angesehen werden kann. Das darunter liegende Material erfährt eine weitaus langsamere Deformation, sodass es nach wie vor als Festkörper beschrieben werden muss. Auch in aktuellen Forschungsarbeiten, die die prozessunabhängige Variation der Parameter erlauben, konnte ein eindeutiger Beweis für eine der Theorien bislang noch nicht gefunden werden [Nie18]. Die kontroverse Diskussion besteht bereits seit langem, wie bereits frühere [God71] [Gor78] und auch aktuelle [Pel18] theoretische Arbeiten zeigen.

2.7.2 Mechanische Eigenschaften

Während des Prozesses kommt es in unmittelbarer Nähe der Fügezone zu einer Gefügeänderung. Dieser Bereich ist vor allem durch ein ultrafeinkörniges Gefüge charakterisiert. Abbildung 2.15 zeigt dies beispielhaft für die Verbindung von Titan mit Stahl. Bei dieser artungleichen Verbindung ist zusätzlich eine intermetallische Phase vorhanden, die in Abschnitt 2.7.3 behandelt wird.

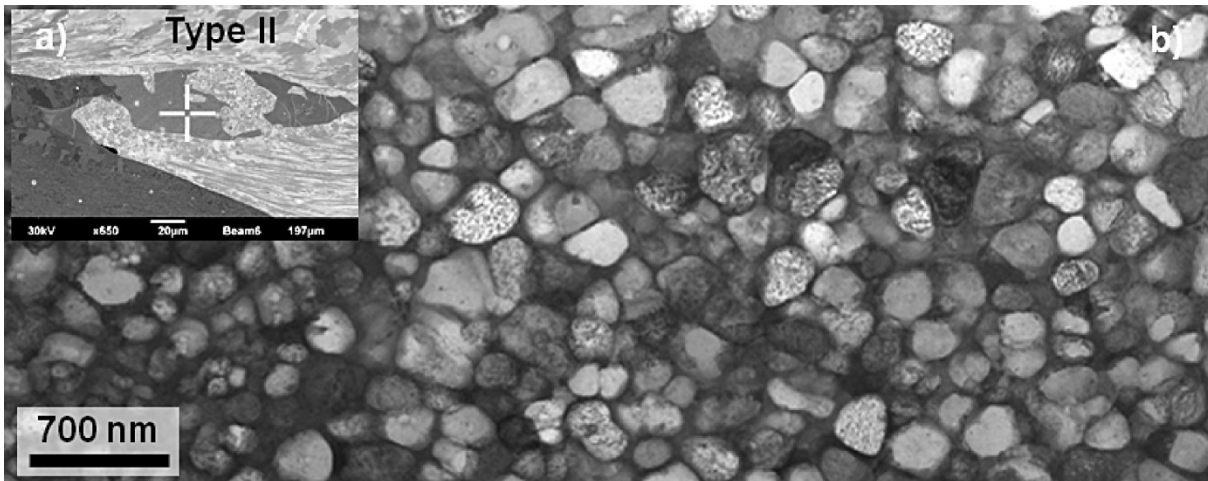


Abbildung 2.15 Ultrafeinkörniges Gefüge bei einer artungleichen Verbindung aus Titan mit Stahl, gefügt durch Sprengschweißen [Son11b].

Dieses ultrafeinkörnige Gefüge verleiht einer kollisionsgeschweißten Verbindung daher, zusammen mit der möglichen Kaltverfestigung aufgrund der Wellenbildung, sehr gute statische Festigkeitswerte. In aller Regel ist die Fügezone daher fester als das schwächere Grundmaterial, wodurch das Versagen außerhalb der Fügezone auftritt [Aiz07] [Gro87] [Ito16] [Kas10] [Pab16b**] [Shr69] [Shr08] [Viv13]. In Abbildung 2.16 ist beispielhaft das Versagen von Aluminium-Stahl Schweißungen mit dem charakteristischen Scherversagen im Aluminiumgrundwerkstoff gezeigt. Die Dauerfestigkeit einer solchen Verbindung ist ebenfalls sehr gut [Reb16b].

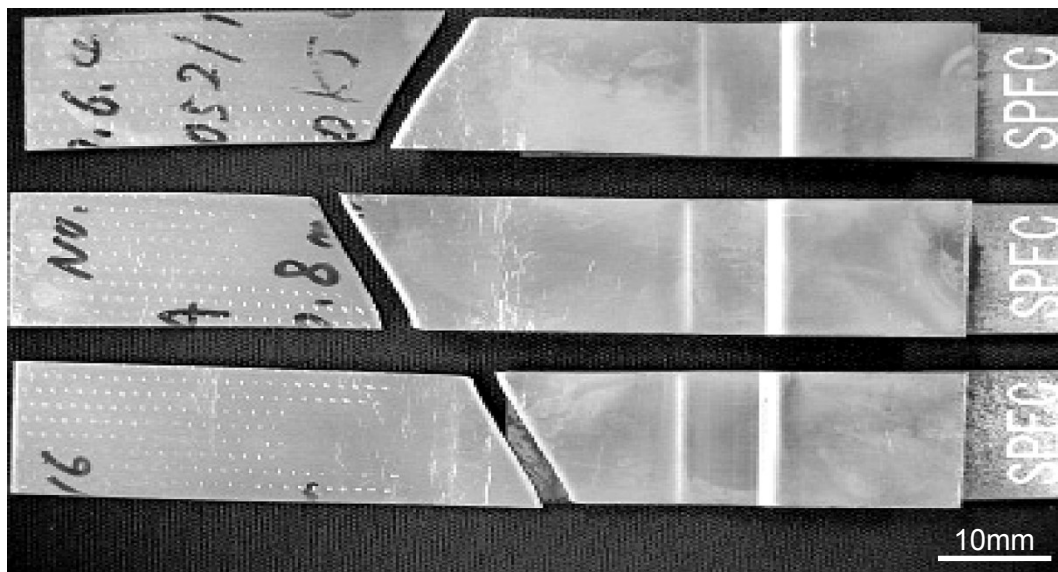


Abbildung 2.16 Ergebnisse aus dem Zugversuch an Aluminium-Stahl Schweißungen [Kas10]. Die Proben versagen im Aluminium.

Voraussetzung ist allerdings in jedem Fall, dass der Prozess korrekt eingestellt ist. Vor allem bei Verbindungen mit Aluminium können die erzielbaren Festigkeiten über denen anderer Verfahren liegen, wie dem Schmelzschweißen oder dem Rührreibschweißen. Dort kann der Prozess zu einer Verringerung der Grundfestigkeit aufgrund einer unvorteilhaften Gefügeentwicklung führen.

Mikro- und Nanohärtemessungen zeigen durchweg, dass die Fügezone härter ist als die Grundwerkstoffe [Aiz07] [Bor16] [Fae16] [Ito16] [Lee07] [Ste14] [YuX13] [Zha10b]. Dieser Befund ist unabhängig von den beteiligten Metallen. Der Effekt wird zum einen zurückgeführt auf die dynamische Rekristallisation¹⁰. Falls die Fügezone bei artungleichen Verbindungen aus der intermetallischen Phase besteht, trägt auch sie zu einer Erhöhung der Härte bei [Ste14]. Abbildung 2.17 und Abbildung 2.18 zeigen beispielhaft die Härteverteilung bei einer artungleichen Verbindung aus Aluminium und Kupfer mit einer intermetallischen Phase sowie der artgleichen Verbindung von Aluminium und Kupfer.

¹⁰ Neubildung von Körnern im metallischen Werkstoffgefüge, siehe Kapitel 13: Glossar

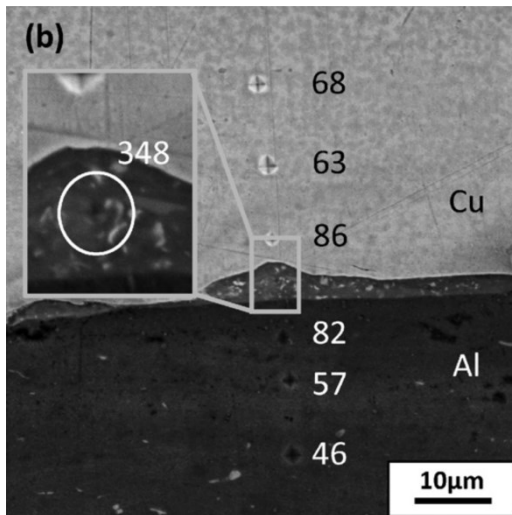


Abbildung 2.17 Ergebnisse der Mikrohärtmessung an einem Aluminium-Kupfer Verbund [Ito16], Werte in HV.

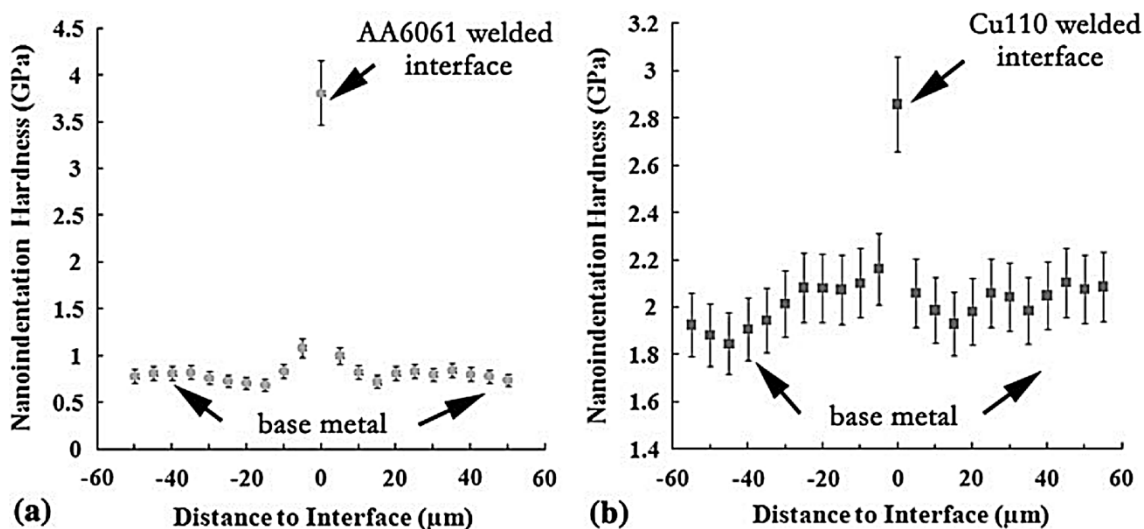


Abbildung 2.18 Ergebnisse der Mikrohärtmessung an artgleichen Verbünden aus EN AW-6061 (links) und Kupfer (rechts, 2.0060) [Zha10b].

Der Betrag des Härteanstiegs variiert in der Literatur stark: Die Spanne reicht von etwa 15 % [Ste14] bis zum dreifachen [Zha10b] oder sogar mehr als siebenfachen Wert [Ito16]. Eine verlässliche Vergleichbarkeit der Messungen ist allerdings kaum gegeben. Es handelt sich um verschiedene Werkstoffe, verschiedene Prozessführungen und verschiedene Messmethoden. Darüber hinaus ist der genaue Ort der Messung im Fügebereich nicht bekannt.

2.7.3 Metallurgische Eigenschaften

Bei entsprechender Vergrößerung zeigen kollisionsgefügte Verbünde immer eine Zwischenschicht, die sich bereits im ungeätzten Zustand optisch von den beiden Grundwerkstoffen unterscheidet. Dies gilt gleichermaßen für artgleiche Verbindungen und für artungleiche Verbindungen. Abbildung 2.19 und Abbildung 2.20 zeigen die Zwischenschicht beispielhaft für artgleiche Verbindungen von Aluminium.

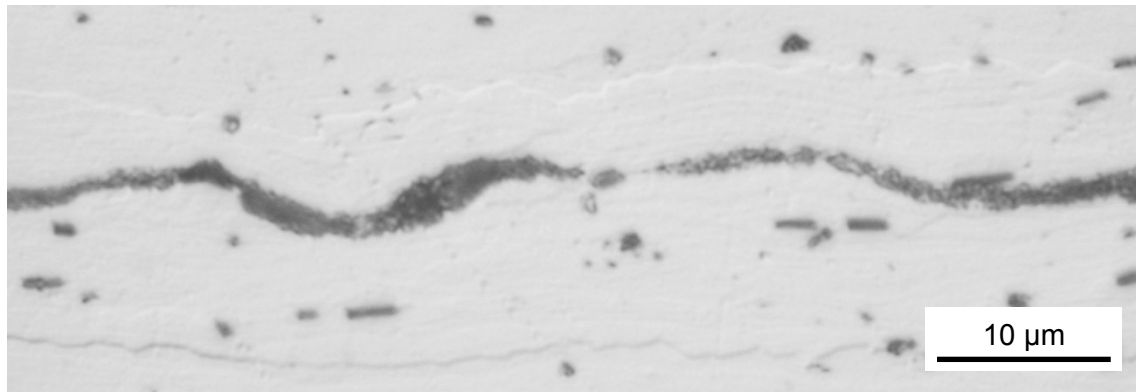


Abbildung 2.19 Artgleiche Fügezone zwischen EN AW-1050A [Gro14**].

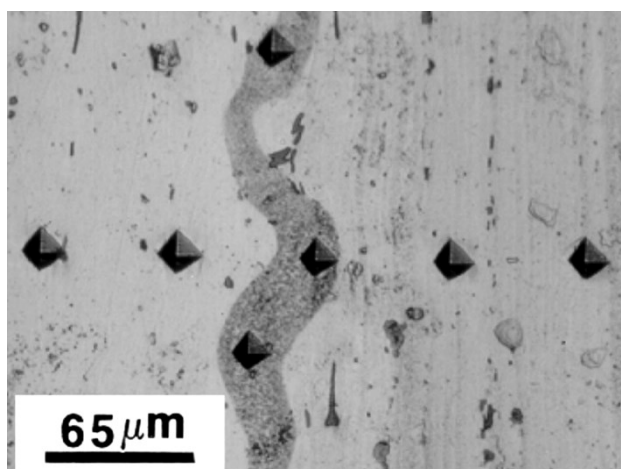


Abbildung 2.20 Artgleiche Fügezone zwischen EN AW-7075 [Ste14].

Bei artungleichen Verbindungen ist die Fügezone noch auffälliger. So ist sie in aller Regel breiter und weniger homogen. Mikroskopische Untersuchungen sind in der Literatur zahlreich vorhanden und zeigen oftmals Poren unterschiedlicher Größe und Risse [Rao15] [Son11a] [Ste14] [YuX12]. In den folgenden Abbildungen sind beispielhaft einige Aufnahmen gezeigt. Es ist zu beachten, dass bei EDX Analysen in der Fügezone keine Oxide detektiert werden.

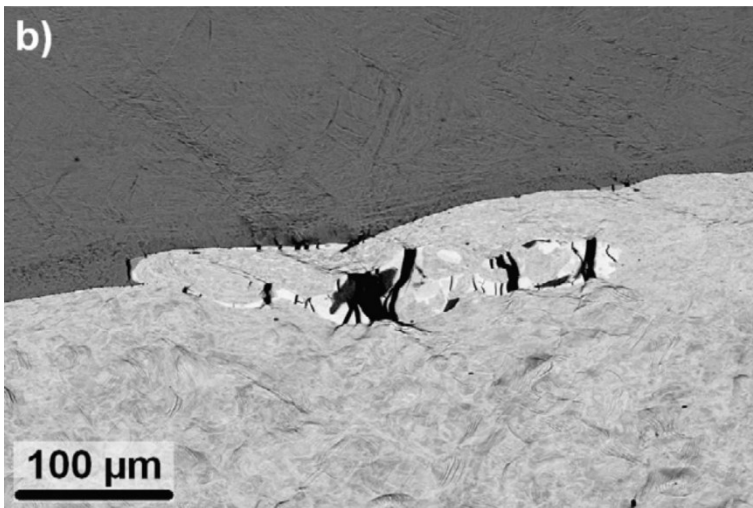


Abbildung 2.21 Sprengplattierte Verbindung von Titan (oben) mit Stahl [Son11a].

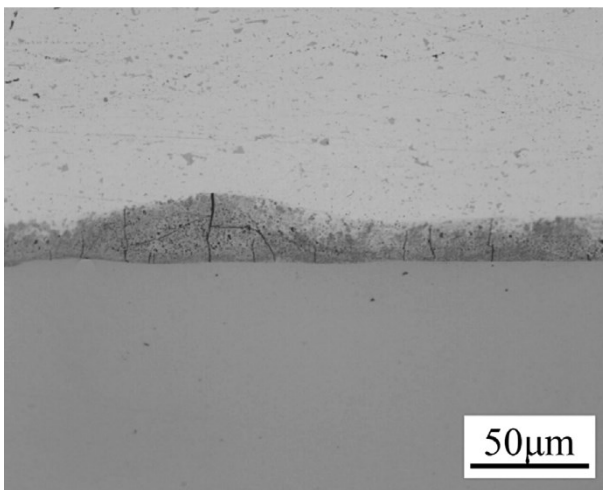


Abbildung 2.22 Verbindung von EN AW-3003 (oben) und 1.7218 [Che16].

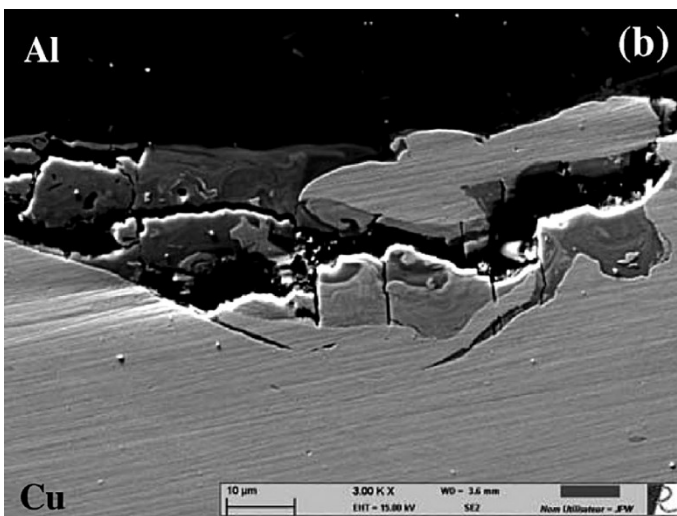


Abbildung 2.23 Verbindung von Aluminium (oben) mit Kupfer [Rao15].



Abbildung 2.24 Sprenggeschweißte Verbindung mit zu hoher Energie von Inconel mit rostfreiem Stahl mit Poren [Car75].

Elementanalysen zeigen, dass es sich bei dieser Schicht immer um eine intermetallische Phase handelt, deren Zusammensetzung allerdings von den Prozessparametern abhängig ist. Diese in aller Regel spröden intermetallischen Phasen sind ein Grund für den in Abschnitt 2.7.2 diskutierten, teils starken Anstieg der Härte in der Fügezone.

Als Ursprung dieses Gefüges werden zwei Mechanismen diskutiert. Nach einer Überlegung soll es sich dabei um einen Teil des Jets handeln, der in der Fügezone verbleibt [Car75] [Che16] [Cow63] [Son11a]. Dafür spricht, dass diese Phase bei ausgeprägten Wellen nur partiell in den Wirbeln vorhanden ist, wie Abbildung 2.21 zeigt. Nach einer anderen Überlegung ist die plastische Deformation hinter dem Jet für die Temperaturerhöhung verantwortlich, es sind also getrennt zu behandelnde Phänomene [Bor16] [Mar05] [Ste14]. Beiden Annahmen ist gemein, dass die Energie aus der kinetischen Energie beim Aufprall stammt. Dabei handelt es sich also letzten Endes um Wärmeenergie, die aus Umformenergie frei wird.

Einige Autoren sehen die Fügezone als erstarrte Schmelze an [Cow63] [Fae10] [Sha16**] [Ste14]. Daher muss während des Prozesses eine signifikante Erwärmung in diesem Bereich stattgefunden haben. Unterstützt wird diese Theorie durch feinkörniges, stängelförmiges Gefüge in diesem Bereich, das auf eine schnelle Abkühlung schließen lässt, beispielhaft gezeigt in Abbildung 2.25. Die durch den Prozess eingebrachte Wärmeenergie fließt sehr schnell in das dahinter liegende Grundmaterial ab. Dabei werden Abkühlraten um 10^5 K/s [Ste14] bis 10^8 K/s angenommen [Bor16].

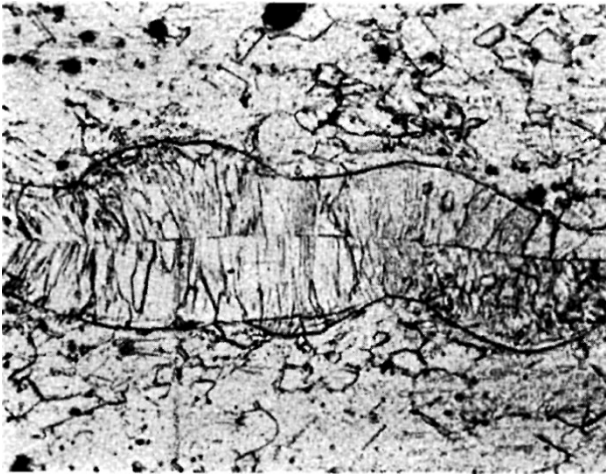


Abbildung 2.25 Stängelförmiges Gefüge in der Fügezone bei einer artgleichen Kupferverbindung [Cow63].

Alleine das Vorhandensein einer spröden, intermetallischen Phase führt jedoch nicht automatisch zu ungenügenden mechanischen Eigenschaften der Verbindung. Während bei intermetallischen Phasen in Dickenbereichen um wenige Mikrometer davon ausgegangen wird, dass sie keinen oder wenig negativen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften haben, können dickere Schichten eine deutliche Verschlechterung bewirken und sogar als Startpunkt für den Riss im Versagensfall fungieren [Bor16]. Als Höchstgrenze für eine unkritische Dicke der intermetallischen Phase werden für eine Verbindung aus Aluminium und Stahl beispielsweise 7 μm angegeben [Spr11, S. 128] und 5 μm für eine Verbindung aus Aluminium und Kupfer [Göb10].

Wie auch die Ausprägung der wellenförmigen Struktur ist dieses Phänomen beim Sprengschweißen oft ausgeprägter als beim elektromagnetischen Pulsschweißen. Dies ist ebenfalls durch die höheren Energien erklärbar. Im Prozessfenster von Abbildung 2.9 in Abschnitt 2.4 entspricht dies einem Bereich weiter oben rechts. Dort befindet sich auch die erwähnte obere hyperbolische Prozessgrenze, bei der ein zu starkes Aufschmelzen zu einer Verschlechterung der Verbindungseigenschaften führt. Ursächlich können also zu dicke intermetallische Phasen sein, deren spröde Eigenschaften dann die Verbindungseigenschaften bestimmen. Abbildung 2.24 zeigt dies beispielhaft.

2.8 Prozessleuchten und Temperatur in der Fügezone

Das Kollisionsschweißen unterscheidet sich vom Schmelzschweißen unter anderem durch die wesentlich geringere Temperaturerhöhung der Werkstücke während des Prozesses. Wie die mikroskopischen Untersuchungen der Fügezone in Abschnitt 2.7.3 zeigen, können trotzdem lokal die Schmelztemperaturen der beteiligten Werkstoffe erreicht werden. Genauere, experimentelle Betrachtungen des Temperaturfeldes um die Fügezone während des Prozesses können nach aktuellem Stand der Technik nicht durchgeführt werden. Die herrschenden Temperaturen, die vergleichsweise kleine Fügezone sowie die kurze Zeitskala verhindern dies bislang. So wird lediglich das Werkstoffgefüge dahingehend interpretiert, beispielsweise in [Ste14] oder [Rao15]. Das Resultat ist durchgängig die Erkenntnis, dass die Temperatur die Schmelztemperatur der beteiligten Werkstoffe übersteigen muss. Systematische Untersuchungen, beispielsweise mit Werkstoffen, die besonders niedrige oder besonders hohe Schmelztemperaturen aufweisen, sind bislang nicht durchgeführt worden.

Die Kollision zwischen den Fügepartnern geht mit einem Lichtblitz einher. Dieses Prozessleuchten lässt sich bei allen Verbindungen feststellen, es ist in der Vergangenheit jedoch noch nicht systematisch untersucht worden. Beim Sprengschweißen sorgt wahrscheinlich der detonierende Sprengstoff dafür, dass es nicht erkennbar ist. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen ist es ungestört beobachtbar und rückt zunehmend in den Vordergrund [Aul15*]. So wird es beispielsweise in [Bel18] und [Bel19] genutzt, um die Qualität der Schweißung in situ¹¹ zu bestimmen. Die Untersuchung der spektralen Verteilung ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

¹¹ während des Prozesses stattfindend, siehe Kapitel 13: Glossar

2.9 Numerische Simulation des Prozesses

Der numerischen Simulation des Kollisionsschweißens kommt eine besondere Bedeutung zu, da der Prozess mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nur eingeschränkt beobachtbar ist. Allerdings führt genau diese Wissenslücke dazu, dass die Ergebnisse kaum verifiziert werden können. Sie müssen daher mit der notwendigen Vorsicht interpretiert werden.

Hauptzwecke der numerischen Simulationen sind in der Literatur oftmals makroskopische Untersuchungen des Aufprallwinkels oder der Geschwindigkeiten, wie sie beispielsweise in [Cuq16], [Els10b], [Gro15**] und [Nas15] vorgenommen werden. Daneben wird in einigen Arbeiten zusätzlich der Versuch unternommen, das Prozessfenster aus Winkel und Geschwindigkeit am Kollisionspunkt mit der numerischen Simulation abzugleichen und vorherzusagen [Cuq16] [Fan14] [Gro14**].

Allen numerischen Simulationen ist jedoch gemein, dass das Umgebungsmedium und mögliche Wechselwirkungen immer unberücksichtigt bleiben. Wie in [Pab16a**] und [Pab16b**] gezeigt wird, hat es allerdings eine signifikante Auswirkung auf die Größe der Fügezone sowie deren Festigkeit bei ansonsten identischen Prozessparametern. Ebenso wenig werden chemische Reaktionen in der Fügezone sowie Phasenwechsel (fest-flüssig-fest) abgebildet. Das Temperaturfeld um die Fügezone wird kaum betrachtet und wenn, dann mit stark differierenden Ergebnissen. In [Ser09] wird eine Temperaturerhöhung in der Fügezone von 22 K bis 132 K für eine Verbindung von Aluminium und Stahl berechnet, in [Akb05] wird für eine artgleiche Verbindung aus rostfreiem Stahl eine absolute Temperatur in der Fügezone von 1040 K ermittelt. Die bestehenden experimentellen Befunde, die in den Abschnitten 2.7.3 und 2.8 vorgestellt werden, belegen allerdings durchgängig eine höhere Temperatur von teilweise über 1000 °C. Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist es daher nicht möglich, den Prozess numerisch ausreichend genau abzubilden, sodass sich daraus keine belastbaren Informationen gewinnen lassen.

2.10 Bestehende Hypothesen zur Verbindungsbildung

Aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeiten und der dadurch begrenzten Beobachtbarkeit sind die exakten Mechanismen, die zur Ausbildung der Verbindung führen, nicht mit Sicherheit geklärt. Die gängigste Vorstellung ist, dass der Prozess in zwei Phasen beschrieben werden kann.

Zunächst wird der oberflächennahe Bereich vor der Fügezone beim Aufprall aufgrund dynamischer Effekte als sogenannter Jet ausgestoßen. Dadurch wird die obere (Oxid-)Schicht entfernt, die eine Verbindung verhindern würde. In der Literatur herrscht Konsens darüber, dass die Bildung des Jets und dessen Ausstoß aus der Kollisionszone zur Ausbildung einer Verbindung notwendig sind. Der Mechanismus wird häufig analytisch beschrieben (beispielsweise in [Mil98]), numerisch berechnet (beispielsweise in [Wan12]) und experimentell beobachtet (beispielsweise in [Ber66]). Notwendig ist in jedem Fall ein entsprechender Wertebereich von Winkel und Geschwindigkeit am Kollisionspunkt, was sich auch im Prozessfenster zeigt, das in Abschnitt 2.4 beschrieben wird. Häufig zitierte Überlegungen zur Entstehung des Jets werden in Abbildung 2.26 gezeigt. Es ist dabei allerdings nicht geklärt, ob der Jet den Spalt als Staub oder Metallzunge verlässt, beziehungsweise unter welchen Bedingungen welche Erscheinungsform zutage tritt. Die vorhandenen Beobachtungen liefern hier noch keinen zweifelsfreien Aufschluss.

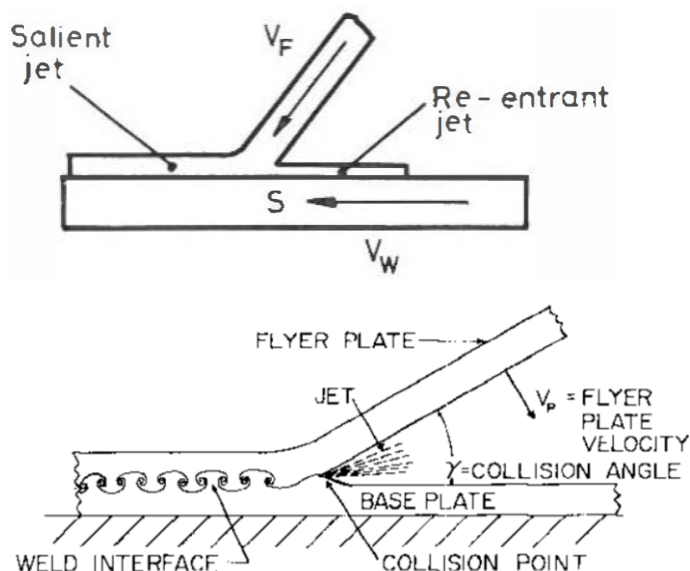


Abbildung 2.26 Jetbildung am Kollisionspunkt (oben: [Cro82, S.17]; unten: [Car75]).

Im Anschluss folgt der eigentliche Fügevorgang. Hinter dem Kollisionspunkt wird das nun freiliegende Grundmaterial beider Fügepartner durch den hohen Druck bei der Kollision zusammen gepresst, sodass eine metallische Verbindung entsteht. Dieses Zusammenpressen ist der Grund, weshalb das Verfahren in der Vergangenheit auch mit Betrachtungsweisen des Pressschweißens untersucht worden ist [Gey15].

Allgemein gibt es Bestrebungen, das Kollisionsschweißen in ein Schema für alle Schweißprozesse einzugliedern [Lys12], wobei Zeit, Druck und Temperatur die maßgeblichen Größen sind. Während sich die Zeitskala noch vergleichsweise präzise bestimmen lässt, kann der herrschende Druck nur grob abgeschätzt werden. Hier wird von etwa 1-15 GPa ausgegangen [Akb05] [Ste14]. Die Temperatur und deren Wirkung sind bislang ebenfalls nicht bestimmt. Bei den konventionellen Schweißverfahren ist die Temperaturführung von großer Bedeutung und wird aktiv beeinflusst. Beim Kollisionsschweißen ist diese Möglichkeit nicht bekannt. Es ist zudem nicht geklärt, ob die Temperaturerhöhung nur eine untergeordnete Auswirkung der plastischen Deformation beim Aufprall ist oder sie die Verbindungseigenschaften maßgeblich mitbestimmt. Von metallographischen Schliffbildern ist bekannt, dass die Fügezone praktisch aller kollisionsgeschweißten Verbindungen Bereiche aufweist, die als erstarrtes Schmelzgefüge identifiziert werden, was in Abschnitt 2.7.3 gezeigt wird.

Von untergeordneter Bedeutung für die Verbindungsbildung ist die wellenförmige Geometrie der Zwischenschicht. Wie in Abschnitt 2.7.1 zusammengefasst wird, existieren zu ihrer Entstehung kontroverse Erklärungsansätze. Untersuchungen belegen zudem, dass Verbünde auch ohne jede Ausbildung der Wellen erzielt werden können [Göb10]. Einigkeit besteht darüber, dass eine wellenförmige Zwischenschicht mit einer größeren Festigkeit der Verbindung einhergeht. Es besteht eine zusätzliche mechanische Verhakung, die wahre Anbindungsfläche ist größer und der Werkstoff erfährt lokal eine Kaltverfestigung.

2.11 Zusammenfassung

Die Fügeverfahren Explosionsschweißen und elektromagnetisches Pulsschweißen werden aufgrund ihrer oftmals großen Vorteile gegenüber anderen Schweißverfahren bei den Verbindungseigenschaften industriell eingesetzt. Diese Eigenschaften, wie beispielsweise eine hohe Festigkeit und Zähigkeit, sind experimentell gut untersucht. Die eigentlichen Mechanismen der Verbindungsentstehung sind jedoch nicht identifiziert, weshalb bei der Auslegung einer Fügestelle größtenteils empirisch vorgegangen werden muss. Dabei werden fast immer technologieabhängige Prozessparameter variiert, was die Übertragbarkeit verhindert. Allgemeine Prozessfenster sind kaum vorhanden und stützen sich zudem auf ungenaue Daten. Die herrschenden und notwendigen Bedingungen in der Fügezone sind zwar analytisch und numerisch untersucht worden, die Ergebnisse divergieren jedoch teilweise stark und sind aufgrund der fehlenden experimentellen Verifizierung noch nicht aussagekräftig. Für die Mechanismen existieren daher bislang nur Hypothesen. Messungen während des Prozesses, wie beispielsweise das Temperaturfeld, die Geschwindigkeiten oder Drücke, sind kaum vorhanden. Die vorliegenden Daten in der Literatur sind nicht aussagekräftig, da sie aufgrund der großen Unsicherheiten stark divergieren oder sich sogar widersprechen. Daher ist es nicht möglich, eine Hypothese zu belegen oder zu widerlegen. Insbesondere der zeitliche und örtliche Temperaturverlauf in der Fügezone ist zwar einigen Forschergruppen als Parameter bekannt, wird jedoch in seinem Einfluss auf die Ausbildung und Eigenschaften der Verbindung nicht bewertet.

3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehen

3.1 Motivation und Zielsetzung

Das Kollisionsschweißen, industriell eingesetzt als Sprengschweißen und elektromagnetisches Pulsschweißen, kann bei der Erzeugung stoffschlüssiger Verbünde zwischen artgleichen und auch artungleichen Metallen große Vorteile gegenüber konventionellen Schweißverfahren bieten. Dazu zählt vor allem die hohe mechanische Festigkeit, die das Verfahren für Verbindungen mit hoher Werkstoffausnutzung prädestiniert. Damit erschließt sich ein großes Anwendungsfeld in der Fertigungstechnik, nicht zuletzt getrieben von der Entwicklung immer anspruchsvollerer Produkte. Auf der anderen Seite muss die Auslegung der Verbindungszone aber nach wie vor zu einem großen Teil empirisch erfolgen und ist damit zeit- und kostenintensiv. Es besteht das Risiko, dass das Potential des Verfahrens nicht vollständig ausgenutzt wird.

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass die Entstehung der Fügezone noch nicht vollständig verstanden ist. Ursächlich hierfür ist, dass eine örtlich und zeitlich hoch aufgelöste in situ Beobachtung der Fügezone aufgrund technischer Limitierungen bislang noch nicht durchgeführt worden ist. Gerade dieser mikroskopische Bereich zwischen den beiden Fügepartnern bestimmt jedoch die später relevanten makroskopischen Eigenschaften der Verbindung. Die bestehenden Theorien basieren daher ausschließlich auf einem Vorher-Nachher-Vergleich der Fügepartner und sind oftmals sogar widersprüchlich. Zudem werden fast ausschließlich technologieabhängige Parameter variiert, die eine unklare Wirkung auf die technologieunabhängigen Parameter haben, die ihrerseits nicht vollständig bekannt oder gar quantifiziert sind.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen daher helfen, diese Wissenslücken hinsichtlich der Fügezone zu verringern. Dazu soll geklärt werden, welche thermischen Zustände während des Prozesses die Entstehung und die Gestalt der Fügezone dominieren können. Bezüglich der Temperaturentwicklung sind bislang kaum Untersuchungen durchgeführt worden, obwohl das Erscheinungsbild der Fügezone Indizien für eine signifikante Erhöhung der Temperatur während des Prozesses liefert.

3.2 Einordnung dieser Arbeit

Das langfristige Ziel der Forschung ist die Bereitstellung möglichst allgemein gültiger Prozessfenster und Konstruktionsvorschriften, um eine Fügestelle zielgerichtet auslegen zu können. Dies ist beispielsweise bereits in ähnlicher Form für das Schmelzschweißen der Fall. Es betrifft nicht nur die Werkstücke in ihrer Geometrie sowie die metallurgischen Eigenschaften und die Oberflächenbeschaffenheit, sondern auch die Anlagentechnik. In der praktischen Anwendung soll die Fügestelle in Zukunft in drei Schritten ausgelegt werden können:

1. Ausgehend von den vorliegenden Werkstoffen und ihrem Zustand im Hinblick auf Gefüge und Oberfläche werden die einzustellenden, lokalen Kollisionsparameter bestimmt. Diese sind zunächst technologieunabhängig und können daher losgelöst von der Geometrie und dem Prozess betrachtet werden.
2. Der notwendige Materialfluss zur Erzielung der vorgegebenen Kollisionsparameter wird eingestellt, indem die Geometrie der Fügepartner sowie die erforderliche Druckverteilung und der zeitliche Druckverlauf auf den Flyer bestimmt werden. Ebenfalls von Interesse ist die (geometrische) Steifigkeit des Targets. Die Druckverteilung und der zeitliche Druckverlauf sind zunächst unabhängig vom konkreten Prozess und der Anlage.
3. Die Anlage und der Prozess werden so ausgelegt, dass die notwendige, zuvor bestimmte Druckverteilung sowie ihr zeitlicher Verlauf aufgeprägt werden können. Beispielsweise sind dies beim elektromagnetischen Pulsschweißen die Kenndaten des Pulsgenerators sowie die Geometrie und die elektrischen Eigenschaften der Werkzeugspule.

Die Ergebnisse dieser Arbeit fließen direkt in den ersten Schritt der Auslegung ein und liefern einen Beitrag, um vor allem die thermischen Zustände in der Fügezone zu verstehen. Dies soll jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass sowohl in diesem ersten, als auch in den nachfolgenden Schritten noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden muss.

3.3 Fragestellungen und Arbeitshypothesen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden Fragestellungen beantwortet. Der Fokus liegt dabei auf der Temperatur unmittelbar in der Fügezone. Das Vorgehen zur Beantwortung der Fragestellungen orientiert sich an den Arbeitshypothesen, mit denen die Phänomene erklärt werden sollen.

1. Woher stammt die Energie für die Temperaturerhöhung in der Fügezone?

Die Temperaturerhöhung in der Fügezone hat drei Ursachen:

- a) Im sich mit vielfacher Schallgeschwindigkeit schließenden Spalt zwischen den Fügepartnern wird das Umgebungsmedium beim Ausstoßen komprimiert und erhitzt sich so weit, dass ein Plasma entsteht. Durch die hohe Temperatur wird selbst bei den kurzen Prozesszeiten eine signifikante Wärmemenge in die oberflächennahen Bereiche der Fügepartner eingetragen.
- b) Beim Aufprall wird ein Teil der kinetischen Energie durch plastische Deformation in Form von Wärmeenergie dissipiert. Dies beinhaltet sowohl die makroskopische Deformation als auch die mikroskopische Deformation in der Fügezone, die auch den Jet hervorbringt.
- c) Der Jet besteht zumindest teilweise aus Staub und weist daher eine große Oberfläche auf. Dessen Entzündungstemperatur wird durch die anderen beiden Mechanismen bereits erreicht. Da der Prozess üblicherweise unter atmosphärischen Bedingungen abläuft, wird durch die Verbrennung des Jets zusätzlich chemische Energie in Form von Wärme frei, die für eine Temperaturerhöhung sorgt.

2. Welche Temperaturen werden in der Fügezone erreicht?

Die Temperatur in der Fügezone kann aufgrund der vorgenannten Mechanismen problemlos bis über 1000 °C erreichen. Diese Temperatur wird allerdings nur sehr kurzzeitig und nur unmittelbar an der Oberfläche vor und in der Kollisionszone erreicht.

3. Wie kann die Temperatur in der Fügezone beeinflusst werden?

Die Temperatur kann praktisch auf zwei Arten beeinflusst werden: Bei Unterdruck können sowohl der Temperatureintrag durch das komprimierte Umgebungsgas als auch durch die Verbrennung minimiert werden. In einer

Vakuumatmosphäre können diese Effekte gänzlich vermieden werden. Inertgase, die eine ähnliche oder geringere Dichte als Luft haben, können ebenfalls zum Einsatz kommen. Damit findet keine exotherme Verbrennung statt. Eine eher theoretische Maßnahme ist die Verringerung der Aufprallenergie durch eine geringere Aufprallgeschwindigkeit. Diese wird jedoch benötigt, um den Materialfluss und hierbei insbesondere die Jetbildung zu ermöglichen. Um die Belastung der Werkzeuge, Anlagen und Werkstücke zu minimieren ist man in der Auslegung ohnehin bereits bestrebt, mit einer möglichst geringen Prozessenergie zu arbeiten.

4. Welche Auswirkungen hat die Temperatur auf die Eigenschaften der Verbindung?

Aufgrund der Temperaturerhöhung kommt es in der Fügezone zu einem Aufschmelzen der oberflächennahen Bereiche mit anschließender, rapider Erstarrung durch den konduktiven Wärmetransport in das darunter liegende Grundmaterial. Je nach Schmelztemperatur der beteiligten Werkstoffe und Höhe der Temperatur tritt das Erstarrungsgefüge unterschiedlich stark ausgeprägt oder gar nicht auf. Ein zu langes Bestehen des schmelzflüssigen Zustandes kann dazu führen, dass die Verbindung durch Kräfte aus dynamischen Effekten wieder geöffnet wird, weil die Schmelze keinerlei mechanische Festigkeit besitzt. Bei artungleichen Verbindungen führt ein erhöhter Wärmeintrag dazu, dass sich intermetallische Phasen stärker ausbilden und mit steigender Dicke vor allem die mechanischen Eigenschaften des Verbundes verschlechtern können.

5. Welchen Effekt hat die Temperaturerhöhung auf die Ausbildung des (ultra-)feinkörnigen Gefüges in der Fügezone?

Das ultrafeinkörnige Gefüge wird auf zwei Arten erzeugt: Aufgrund des fluiddynamischen Verhaltens der beteiligten Metalle unter den hohen Dehnraten kommt es zu erheblichen plastischen Dehnungen. Bedingt durch den gleichzeitig herrschenden, hohen hydrostatischen Druck in der Kollisionszone wird ein Werkstoffversagen unterbunden. Es tritt eine dynamische Rekristallisation ein, die den Saum aus ultrafeinkörnigem Gefüge zwischen den Fügepartnern erklärt. Durch die schnelle Abkühlung einer eventuell zusätzlich vorhandenen Schmelze entsteht ebenfalls ein feinkörniges Gefüge, das jedoch eine dendritische Struktur aufweist und sich daher vom dynamisch rekristallisierten Verformungsgefüge unterscheidet.

6. Wie steht das Prozessleuchten während der Kollision mit der Temperatur in Verbindung?

Das Prozessleuchten besteht aus drei Komponenten: Zum einen wird es durch das komprimierte, gasförmige Umgebungsmedium emittiert, das sich bis in seinen Plasmazustand erhitzt. Zum anderen besteht das Leuchten aus der Verbrennung des Jets, wofür das heiße Plasma die Zündquelle darstellt. Außerdem kann der Jet durch die plastische Deformation allein so heiß werden, dass er im sichtbaren Wellenlängenbereich abstrahlt.

3.4 Vorgehen

Die Ursachen für die Temperaturerhöhung sind mutmaßlich die plastische Deformation, die Kompression des Umgebungsmediums im sich schließenden Spalt sowie die Verbrennung des Jets. Durch Variation des Umgebungsmediums lassen sich diese Effekte voneinander trennen. Inerte Gase wie Stickstoff oder Argon verhalten sich mechanisch und thermodynamisch ähnlich wie Luft, unterhalten jedoch nicht die Verbrennung. Dadurch sollten sich sowohl die Intensität des Leuchtens als auch dessen spektrale Verteilung ändern. Bei Versuchen im Vakuum beziehungsweise Unterdruck kann zusätzlich die Erwärmung durch die Kompression vernachlässigt werden, sodass nur noch der durch plastische Deformation zum Glühen erwärmte Jet übrig bleibt. Analytische Abschätzungen und die Energiebilanz aus eingebrachter kinetischer Energie und Temperaturerhöhung der Probe unterstützen die experimentellen Arbeiten. Die Beeinflussung der Temperatur ist inhärenter Bestandteil der vorgenannten Untersuchungen.

Die Temperatur in der Fügezone lässt sich in diesem Rahmen nicht ausreichend genau direkt messen. Stattdessen werden andere Messungen und Beobachtungen genutzt, um die Temperaturen abzuschätzen, beispielsweise das Prozesslicht. Außerdem lässt sich aus der Temperatur der gefügten Probe unmittelbar nach dem Prozess die Temperatur in der Fügezone während des Prozesses näherungsweise zurückrechnen.

In den Versuchen werden mit Aluminium und Kupfer unterschiedliche Werkstoffe eingesetzt. Aufgrund verschiedener Schmelz- und Entzündungstemperaturen kann hier zusätzlich die Temperatur sowie deren

Einfluss untersucht werden. Zusätzlich aufgebrachte, dünne Beschichtungen, die bei der Temperaturerhöhung verdampfen oder verbrennen, erlauben weitere Rückschlüsse auf den Temperaturverlauf und die Herkunft des Prozesslichts.

Die Entstehung des charakteristischen, feinkörnigen Gefüges zwischen den Fügepartnern ist aufgrund der geringen Dicke von nur einigen Mikrometern bei der gleichzeitig kurzen Prozessdauer in situ hier nicht beobachtbar. Auf die Herkunft lässt sich jedoch im Rahmen der systematischen Parametervariation mit anschließender mikroskopischer Untersuchung rückschließen. So gibt die Form der Körner einen ersten Hinweis auf die Entstehung, da sich dynamisch rekristallisierte Körner von einem Erstarrungsgefüge unterscheiden.

4 Versuchsaufbauten

Zur Durchführung der notwendigen Versuche werden zwei verschiedene Verfahren genutzt: das elektromagnetische Pulsschweißen und ein Analogieversuch. Letzterer ist eine Eigenentwicklung und wird daher genauer beschrieben.

4.1 Elektromagnetisches Pulsschweißen

Das elektromagnetische Pulsschweißen steht als Realprozess zur Verfügung. Das Schweißen von ebenen Blechen bietet gegenüber rohrförmigen Geometrien den für diese Arbeit großen Vorteil, dass der Fügebereich optisch sehr gut zugänglich ist und das Studium des Kollisionsablaufes ermöglicht. Genutzt wird ein kommerzielles System der Firma PSTproducts GmbH, bestehend aus einem Pulsgenerator und einer Werkzeugspule „BS130-5“ zum Blechschweißen für Prototypenversuche. Der Pulsgenerator „BlueWave PS32-16“ besitzt ein maximales Energiespeichervermögen von 32 kJ und eine maximale Ladespannung von 16 kV. Das System aus diesem Pulsgenerator und dieser Werkzeugspule entspricht einem gedämpften Schwingkreis und besitzt eine Eigenfrequenz des Entladestroms von etwa 19 kHz. Der maximale Betrag des Stroms bei der Entladung beträgt etwa 470 kA bei 16 kV Ladespannung. Strom und Frequenz sind für den Prozess die maßgeblichen Anlagenparameter.

Der Hauptvorteil der elektromagnetischen Pulstechnologie für die Untersuchungen liegt darin, dass es sich um einen Realprozess handelt, für den bereits viele Verbindungen vor allem experimentell untersucht worden sind. Je nach Ladeenergie lässt sich zudem ein sehr weiter Bereich der Aufprallgeschwindigkeit einstellen und untersuchen.

Nachteilig ist hingegen, dass der Prozess transient ist, sich also Winkel und Geschwindigkeit des Kollisionspunktes wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben kontinuierlich während der Kollision ändern. Zudem muss zumindest der Flyer

immer möglichst gut elektrisch leitfähig sein, weshalb beispielsweise Stahl zum Schweißen üblicherweise nicht als Flyer infrage kommt. Der elektromagnetischen Induktion ist ebenfalls geschuldet, dass der Flyer eine Mindestgröße aufweisen muss. Ansonsten können die Wirbelströme nicht vollständig ausgeprägt werden, weshalb die Beschleunigung bei zu geringer Flyergröße nicht mehr ausreicht. Bei der vorliegenden Entladefrequenz von 19 kHz ist beispielsweise mit technisch reinem Aluminium selbst im weichen Zustand (EN AW-1050A H111) unterhalb von etwa 25 mm x 25 mm bei 2 mm Dicke keine Verschweißung mehr möglich. Daher werden für die Untersuchungen Bleche von 40 mm x 40 mm eingesetzt.

Die Blechschweißspule besitzt eine ebene Oberfläche, in deren Mitte sich als wirksamer Bereich ein Steg von 5 mm x 5 mm Querschnitt befindet. Der sinusförmige Entladestrom wird durch diesen Querschnitt getrieben. Bei den Versuchen werden die Bleche wie folgt angeordnet: Direkt auf die Werkzeugspule, nur von einer etwa 0,5 mm dicken elektrischen Isolation getrennt, befindet sich der Flyer. Im Abstand von 2 mm, der durch Abstandshalter aus Kunststoff gehalten wird, wird das Target aufgelegt. Darauf wird ein gehärteter Stahlblock fixiert, der den Impuls des Aufpralls auf das Target auffängt. Er wird dazu mit der Werkzeugspule verspannt. Die Anordnung vom Spulensteg und den beiden Werkstücken ist schematisch in Abbildung 4.1 gezeigt.

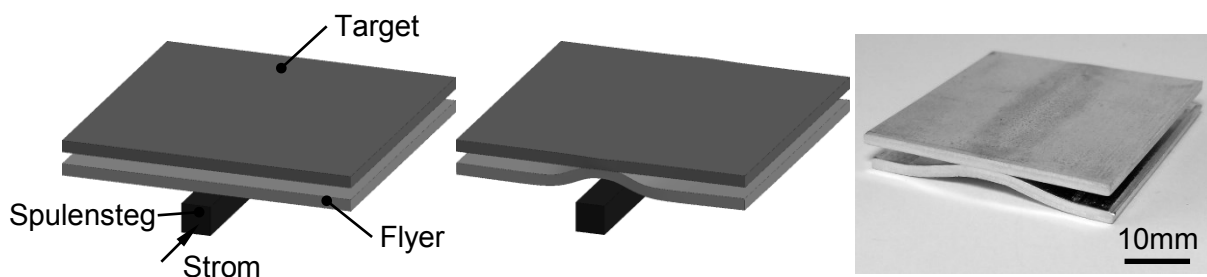


Abbildung 4.1 Schematischer Aufbau für das elektromagnetische Pulsschweißen. Links: vor dem Schweißen. Mitte: nach dem Schweißen. Rechts: Foto der Schweißprobe.

4.2 Mechanischer Analogieversuch

Die beiden industriell eingesetzten Verfahren, das Sprengschweißen und das elektromagnetische Pulsschweißen, besitzen für Grundlagenuntersuchungen signifikante Nachteile. Beim Sprengschweißen sind zwar die Kollisionsparameter konstant, die Explosion verhindert jedoch eine genaue Untersuchung. Die Beobachtung des elektromagnetischen Pulsschweißens ist zwar ungefährlich, die Kollisionsparameter sind jedoch transient.

Daher kommt für die Grundlagenuntersuchungen zusätzlich ein Versuchsstand zum Einsatz, der die benötigte Aufprallgeschwindigkeit zwischen den Fügepartnern rein mechanisch erzeugt und konstante sowie reproduzierbare Kollisionsparameter ermöglicht. Die Vergleichbarkeit mit den Realprozessen wird detailliert in [Gro14**] gezeigt.

4.2.1 Mechanischer Aufbau

Im Kern besteht der Versuchsstand aus zwei gleichsinnig laufenden Rotoren mit einem Durchmesser von 500 mm, die direkt von jeweils einem Synchronmotor angetrieben werden (Abbildung 4.2 oben). An jeweils einem Ende der beiden Rotoren befindet sich eine Fügeprobe, ihr gegenüber am anderen Ende des Rotors ein Gegengewicht.

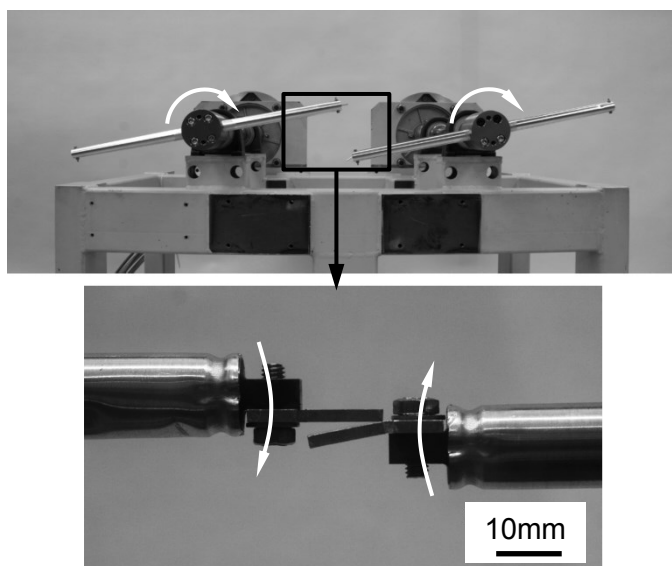


Abbildung 4.2 Darstellung des Versuchsaufbaus. Oben: Frontalansicht. Unten: Detailaufnahme des Kollisionsbereichs mit den Proben im Winkel zueinander und den Probenhaltern an den Rotoren.

Die Rotoren sind so ausgerichtet, dass sich die Fügeproben in der Mitte treffen, wenn beide Rotoren waagrecht stehen. Bei der maximalen Drehzahl von 5000 1/min beträgt die relative Kollisionsgeschwindigkeit 262 m/s. Diese Geschwindigkeit lässt sich entsprechend der Drehzahl exakt einstellen. Der Kollisionswinkel wird über das Biegen einer der beiden Proben vor dem Versuch eingestellt (rechte Probe in Abbildung 4.2 unten).

4.2.2 Proben

Die Proben sind zwischen ihrem am Rotor verschraubten Teil und dem Kollisionsbereich von 12 mm x 12 mm mit einer Taillierung versehen (Abbildung 4.3). Sie dient als Sollbruchstelle und sorgt dafür, dass sich die verschweißte Probe nach der Kollision von den Rotoren lösen kann. Der Kollisionsbereich trennt sich zuverlässig auch dann an der Sollbruchstelle, wenn keine Verbindung erfolgt ist. Die Proben werden aus jeweils einer Rohplatte für jeden Werkstoff lasergeschnitten, um den Einfluss unterschiedlicher gelieferter Chargen zu vermeiden.

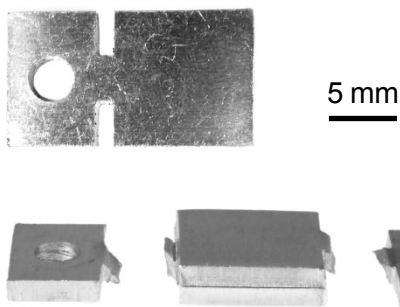


Abbildung 4.3 Oben: Geometrie einer Probe (Aluminium). Unten: gefügte Probe mit auslegungsgemäß versagten Sollbruchstellen.

4.2.3 Aufbau des Antriebs

Die Antriebswellen aus Stahl zwischen den Motoren und den Rotoren sowie die Rotorhalter sind aus Vollmaterial gefertigt und zusammen etwa 4 kg schwer. Dadurch ist die Unwucht bei unterschiedlich schweren Proben sowie nach dem Abreißen der gefügten Probe an der Sollbruchstelle gering und führt nicht zu einer Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften. Abbildung 4.4 zeigt den Aufbau einer der beiden Antriebseinheiten.

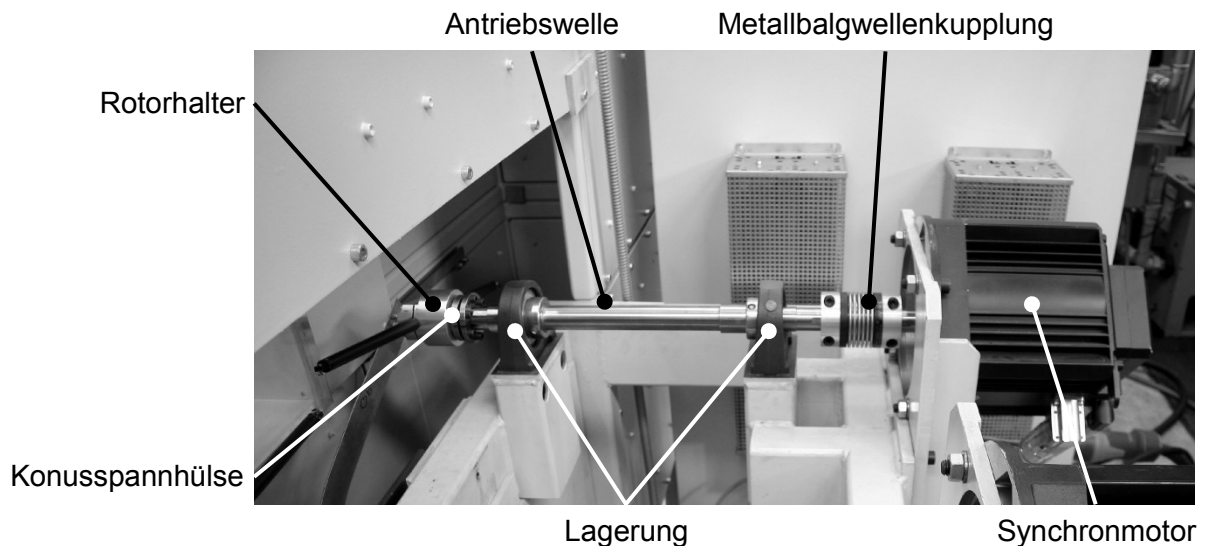


Abbildung 4.4 Eine Antriebseinheit des Versuchsstands.

Die Probenhalter sind aus dem Werkzeugstahl 1.2379 gefertigt. Daher erlauben sie auch Versuche mit Stählen oder anderen, festeren Werkstoffen als Aluminium, ohne dass sie bei der Kollision durch die Sollbruchstelle beschädigt werden. Die Rotoren bestehen aus je einem Aluminiumrohr (EN AW-6060 T6). Da sie einteilig sind, müssen die auftretenden, radialen Kräfte nicht von der Einspannung aufgenommen werden, sondern es erfolgt eine Kompensation durch das Gegengewicht. Die Probenhalter sind elektromagnetisch in das Rotorrohr gecrimpt, wie in Abbildung 4.5 gezeigt wird. Dieser Hochgeschwindigkeitsprozess hat den Vorteil, dass er frei von Rückfederungen ist.

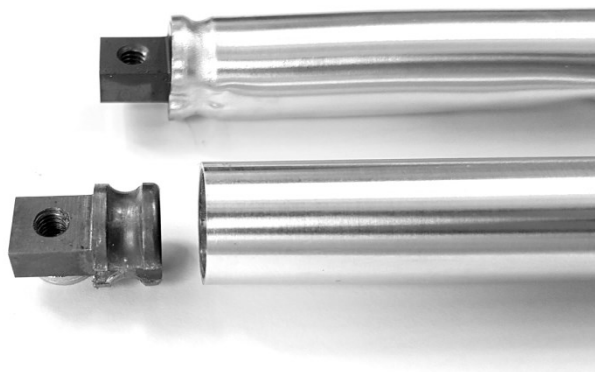


Abbildung 4.5 Probenhalter und Rotorrohr vor (unten) und nach (oben) dem Crimpen.

Die Lebensdauer der Rotoren wird durch unerwünschte Einschläge von abgetrennten Proben nach der Kollision in die sich noch drehenden Rotoren begrenzt. Sie werden verbogen und es ist in der Folge immer schwerer möglich, genau definierte Kollisionsparameter einzustellen. Typischerweise beträgt die Lebensdauer eines Rotors etwa 100 Versuche. Die Probenhalter halten länger und werden wieder verwendet.

4.2.4 Bewegungsablauf

Bis zum Erreichen der Solldrehzahl von 5000 1/min aus dem Stand werden bei maximaler Leistung zwölf Umdrehungen benötigt. Würden die beiden Rotoren synchron beziehungsweise phasengleich starten, so würden die Proben bereits nach der ersten Umdrehung und damit deutlich vor der Solldrehzahl kollidieren. Daher starten die Rotoren mit einem Phasenversatz von 45° , der ein Vorbeilaufen der beiden Proben oberhalb der Kollisionszone ermöglicht (Abbildung 4.6). Der linke Rotor läuft dem rechten zunächst um diesen Winkelversatz hinterher.

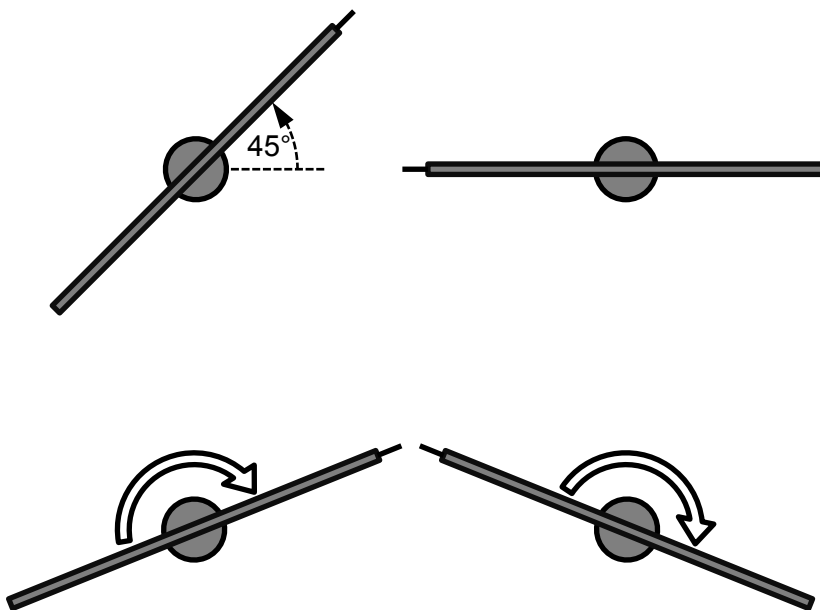


Abbildung 4.6 Startkonfiguration der beiden Rotoren (oben) und Vorbeilaufen der Proben während der Beschleunigungsphase (unten).

Wenn die Solldrehzahl erreicht ist, beschleunigt der linke, nachlaufende Rotor innerhalb von zwei Umdrehungen, sodass er in dieser Zeit $720^\circ + 22,5^\circ$ zurücklegt. Der rechte, vorlaufende Rotor bremst innerhalb von zwei

Umdrehungen ab, sodass er in der selben Zeit $720^\circ - 22,5^\circ$ zurücklegt. Eine Umdrehung vor der Kollision beträgt der Winkelversatz zwischen den Rotoren also noch $22,5^\circ$. Das reicht gerade noch aus, damit die beiden Proben ohne Berührung aneinander vorbeilaufen können. Direkt nach der Kollision erfolgt das Abbremsen der Rotoren, um Einschläge durch die abgetrennten Probenkörper so weit wie möglich zu vermeiden. Der gesamte Durchlauf dauert etwa zwei Sekunden. Die Einzelheiten zum Bewegungsablauf sind in [Die15*] ausführlich beschrieben.

4.2.5 Einhausung

Die beiden Rotoren, nicht jedoch die komplette Länge der Antriebswellen und die Motoren, sind von einer Schutzeinhausung umgeben. Sie ist $2\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ groß und dient primär als mechanischer Schutz, damit umherfliegende Proben sowie im Versagensfall die Rotoren keine Verletzungsgefahr darstellen. Im Inneren der Einhausung sind Fangnetze installiert. Diese sind notwendig, da eine Probe auch nach der Kollision noch eine signifikante kinetische Energie besitzt, aber durch den Aufprall auf die Einhausung nicht zusätzlich deformiert werden soll. Daneben gibt sie auf dem Fangnetz wenig Wärme an die Umgebung ab, was für die späteren Temperaturmessungen vorteilhaft ist (Abschnitt 5.3). Zur Durchführung von Versuchen unter verschiedenen Gasatmosphären ist die Einhausung zusätzlich abgedichtet. Sie ist jedoch nicht vollständig gasdicht und daher aufgrund der hohen Leckrate für Versuche bei Über- oder Unterdruck nicht geeignet. In der Einhausung befindet sich auf Höhe des Kollisionsbereichs ein Fenster aus einer 30 mm dicken Plexiglasplatte, durch das die optische Prozessbeobachtung durchgeführt wird. Dieses Fenster ist ein Bestandteil der zweiteiligen Schiebetür, die den Zugang zum Inneren ermöglicht. Abbildung 4.7 zeigt die Vorderseite der Einhausung mit der Bildverstärkerkamera (Abschnitt 5.1). Die Motoren befinden sich auf der Rückseite.

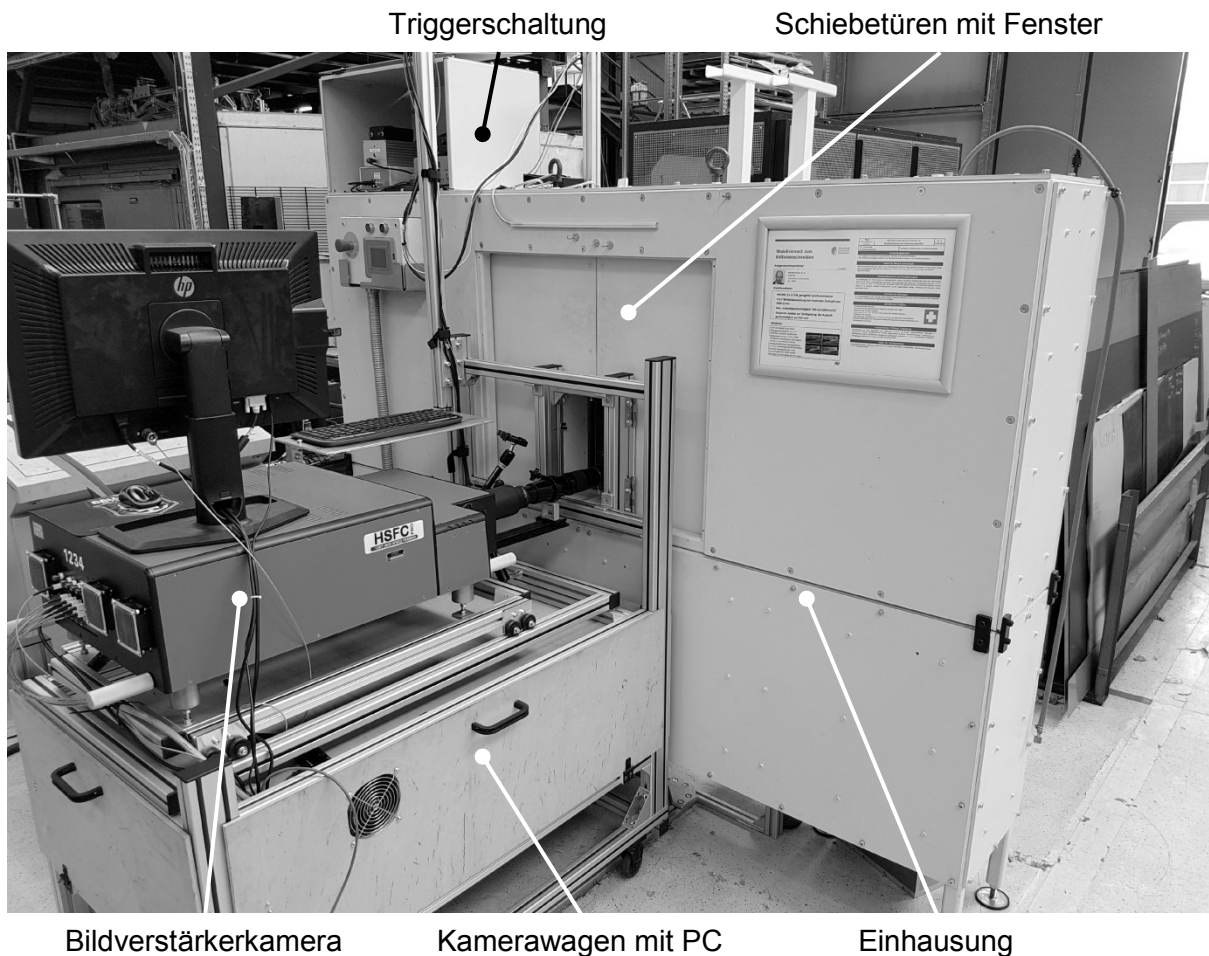


Abbildung 4.7 Einhausung um den Versuchsstand. Im Vordergrund die Kamera und der Zugang mit Fenster.

4.2.6 Trigger für die Prozessbeobachtung

Die beiden Rotoren sind gegenüber den Antriebswellen elektrisch isoliert und dadurch jeweils potentialfrei. Sie selbst sind hingegen vom Rotorhalter bis zur Probe komplett elektrisch leitfähig und Teil des Triggerkreises, der in Abbildung 4.8 skizziert ist. Dabei handelt es sich um eine Spannungsquelle, die mit einem Widerstand und den Rotoren in Reihe geschaltet ist. Wenn die beiden Proben bei der Kollision erstmalig in Kontakt kommen, schließen sie diesen Triggerkreis. Dadurch fließt ein Strom und am Widerstand wird ein Spannungsabfall gemessen. Dieses Signal wird anschließend verdoppelt in ein TTL Signal für den Beleuchtungslaser und ein optisches Signal für die Kamera.

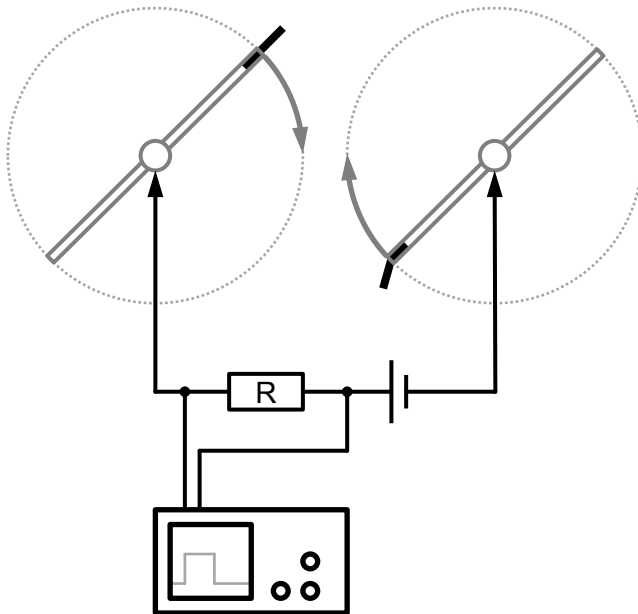


Abbildung 4.8 Schematischer Aufbau der Triggerschaltung.

Wenn elektrisch nicht leitfähige Proben untersucht werden oder isolierende Schichten aufgebracht sind, so wird an einer Kante der Probenoberflächen bis zum Probenhalter Kupferband aufgeklebt, das beim Kontakt der Proben die leitfähige Verbindung herstellt.

4.2.7 Vor- und Nachteile des Versuchsstands

Der Versuchsaufbau besitzt zahlreiche Vorteile im Hinblick auf die Realprozesse elektromagnetisches Pulsschweißen und Sprengschweißen. Sie sind für die dieser Arbeit zugrunde liegenden experimentellen Untersuchungen relevant.

- Der Prozess ist sehr gut beobachtbar. Er findet reproduzierbar an derselben Stelle statt und der Trigger ist zeitlich sehr genau.
- Die Geschwindigkeit der Proben und damit deren kinetische Energie vor der Kollision lassen sich sehr genau einstellen.
- Ein zusätzlicher, undefinierter Wärmeeintrag durch Wirbelströme oder Sprengstoffe ist nicht vorhanden. Damit lässt sich die Energiebilanz des Prozesses aufstellen. Zudem sind die Proben nach der Kollision frei und nicht eingespannt, daher geben sie wenig Wärme an die Umgebung ab.

-
- Der Kollisionswinkel kann bis auf $0,1^\circ$ genau eingestellt werden. Er ist während des gesamten Kollisionsprozesses konstant. [Gro17**]
 - Die Versuchsdurchführung ist schnell, ungefährlich und reproduzierbar. Außerdem treten keine die Messtechnik beeinflussenden, starken elektromagnetischen Felder auf.
 - Es bestehen keine Limitierungen für die Probenmaterialien aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Selbst elektrische Isolatoren können verwendet werden.
 - Vor der Kollision findet keine makroskopische plastische Deformation statt, die die Kollisionsparameter verfälschen könnte.

Der Versuchsaufbau weist allerdings konzeptbedingt die folgenden Schwächen auf:

- Die Maximalgeschwindigkeit liegt mit 262 m/s am unteren Ende des Prozessfensters für eine einfach zu fügende Verbindung aus technisch reinem Aluminium (EN AW-1050A) [Bec15*]. Viele andere Werkstoffe sind daher nicht untersuchbar. Allerdings können hier die beginnenden Mechanismen genau studiert werden.
- Die Probenkörper sind verhältnismäßig klein, so dass beispielsweise keine einfach handhabbaren Zugproben hergestellt werden können.
- Die Einhausung ermöglicht keine Versuche mit Unter- oder Überdruck.
- Es kann zu Nachkollisionen¹² zwischen den Proben und den abbremsenden Rotoren kommen, was sowohl die Proben deformiert als auch die Rotoren beschädigt.

¹² unerwünschte Kollision der Proben nach der eigentlichen, für den Prozess relevanten Kollision, siehe Kapitel 13: Glossar

4.3 Werkstoffe und Probenvorbereitung für die Versuche

Für die Mehrzahl der Versuche wird technisch reines Aluminium (EN AW-1050A) in 2 mm Dicke verwendet. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die im Analogieversuch erreichbare Geschwindigkeit zum Fügen anderer, festerer Werkstoffe nicht ausreichend ist. Die in Abbildung 4.9 gezeigte Walzoberfläche der Proben im Lieferzustand verbleibt unbehandelt und weist eine Rautiefe von etwa $0,45 \mu\text{m}$ (R_a).

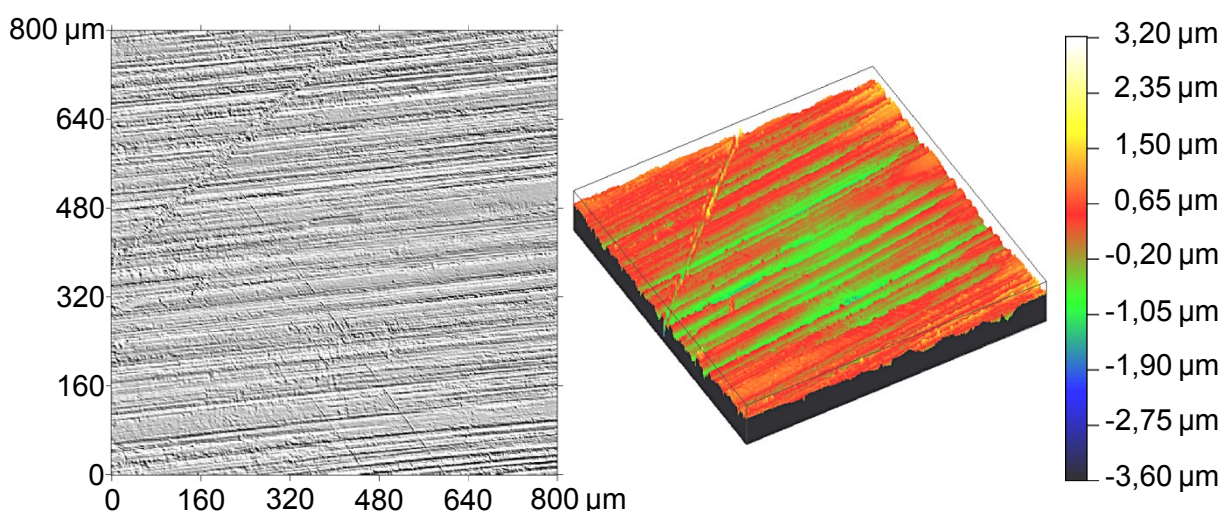


Abbildung 4.9 Oberflächenrauigkeit der Proben im Lieferzustand, nach [Kre13*].

Der Werkstoff liegt in den beiden Zuständen halbhart (H14) und hart (H18) vor, die im Zugversuch ermittelten Festigkeiten sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Dadurch ist es möglich, den Einfluss der mechanischen Kennwerte bei gleichzeitig identischer chemischer Zusammensetzung zu studieren. Die Proben werden ausschließlich so geschnitten, dass die Kollisionsfront und die Walzrichtung parallel sind.

Tabelle 4.1 Gemessene Festigkeitswerte der beiden Zustände der verwendeten Aluminiumlegierung EN AW-1050A.

	H14		H18	
	längs	quer	längs	quer
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	105	112	144	166
R_m [N/mm ²]	116	121	161	180

Die Proben für den Modellversuch werden mittels Laser geschnitten, die größeren Probenbleche für das elektromagnetische Pulsschweißen mit der Schlagschere. Neben Aluminium werden als Referenz zusätzlich Versuche mit Kupfer (2.0060) und Stahl (DC01) in jeweils 1 mm Dicke durchgeführt. Aufgrund der höheren Dichte ist es hier erforderlich, die Dicke zu reduzieren. Andernfalls verschlechtern sich die Regeleigenschaften durch die größere Massenträgheit und das begrenzte Motordrehmoment zu stark. Da diese Werkstoffe nicht Hauptgegenstand der Untersuchungen sind, unterbleibt eine genaue Charakterisierung der Eigenschaften. Alle Proben stammen jeweils aus einer Blechtafel. Vor allen Versuchen werden die zu fügenden Oberflächen mit Aceton gereinigt, um Verschmutzungen zu entfernen.

4.4 Zusammenfassung

Die Versuche werden hauptsächlich mit dem mechanischen Analogieversuch durchgeführt, da sich hier die Kollisionsparameter Winkel und Geschwindigkeit direkt und präzise einstellen lassen. Ein weiterer Vorteil ist die sehr gute Beobachtbarkeit. Als Referenz wird das elektromagnetische Pulsschweißen als Realprozess herangezogen, außerdem sind nur hier Versuche bei Unterdruck möglich. Die untersuchten Werkstoffe Aluminium, Stahl und Kupfer decken einen breiten und industriell relevanten Bereich ab. Da die untersuchte Aluminiumlegierung in zwei unterschiedlichen Zuständen vorliegt, eröffnen sich hier weitere Untersuchungsmöglichkeiten. Nur die mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich bei gleicher chemischer Zusammensetzung.

5 Methoden zur Prozessbeobachtung

Die genauen und konstanten Kollisionsbedingungen im Analogieversuch ermöglichen zeitlich und örtlich hoch aufgelöste optische Beobachtungen während des Prozesses. Damit kann der relevante Bereich der Fügezone untersucht werden. Neben Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden zusätzlich quasistatische Aufnahmen (Langzeitbelichtungen) durchgeführt. Zur Bestimmung der Energiebilanz wird zudem die Temperatur der Proben nach der Kollision mittels einer Wärmebildkamera gemessen.

5.1 Bildverstärkerkamera und Beleuchtungslaser

Die Kollision findet in einem Zeitraum von typischerweise unter $5\text{ }\mu\text{s}$ statt, je nach Kollisionswinkel und damit der Kollisionsgeschwindigkeit, mit der sich der Spalt schließt. Konventionelle Hochgeschwindigkeitskameras liefern hier nach dem aktuellen Stand der Technik in diesem kurzen Zeitbereich zu wenige Bilder, die zudem eine vergleichsweise geringe Auflösung aufweisen.

5.1.1 Funktionsweise der Kamera

Die Bildverstärkerkamera „hsfc-pro“ der Firma PCO erlaubt theoretisch bis zu 300 Millionen Bilder pro Sekunde bei einer unverändert hohen örtlichen Auflösung von 1280×1024 Bildpunkten. Die Belichtungszeit von minimal drei Nanosekunden limitiert die Bildwiederholrate, denn theoretisch lässt sich jede Nanosekunde ein Bild aufnehmen. Da Bewegungen mit bis zu mehreren tausend Metern pro Sekunde gefilmt werden, ist die kurze Belichtungszeit von besonderer Relevanz. Die Kamera nutzt als Verschluss einen Bildverstärker, der nach dem fotoelektrischen Effekt arbeitet und die kurzen Belichtungszeiten erst ermöglicht. Das Funktionsschema ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

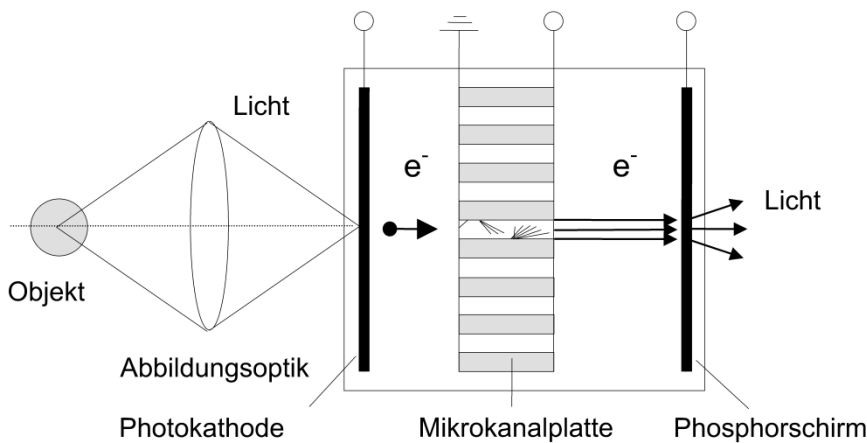


Abbildung 5.1 Schematische Darstellung eines Bildverstärkers [PCO04].

Das einfallende Licht wird von einer Photokathode in Photoelektronen umgewandelt oder blockiert, je nach Polung der Spannung. Sie stellt also den benötigten, extrem schnellen elektrischen Verschluss dar. In der sogenannten Mikrokanalplatte (MCP, „micro channel plate“) werden die Photoelektronen vervielfacht. Auf der anderen Seite regen die Elektronen einen Phosphorschirm zum Leuchten an, der schließlich von einer CCD Kamera abgefilmt wird (nicht dargestellt). Das Prinzip des Bildverstärkers führt dazu, dass die Aufnahmen bei geringer Belichtung ein verstärktes Rauschen aufweisen können. [PCO04]

Ein sogenannter Kanal besteht aus einer Optik, dem Bildverstärker, der CCD Kamera und weiteren elektronischen Komponenten. Er kann maximal zwei Bilder in schneller Folge aufnehmen. Insgesamt besitzt die Kamera hinter einem Strahlteiler vier Kanäle, weshalb sie vier beziehungsweise maximal acht Bilder in schneller Folge aufnehmen kann. Aufgrund der kurzen Prozessdauer von wenigen Mikrosekunden ist dies gegenüber normalen Hochgeschwindigkeitskameras jedoch kein Nachteil, zumal die örtliche Auflösung deutlich höher ist. Der notwendige Strahlteiler muss allerdings genau justiert sein, da die Aufnahmen der einzelnen Kanäle andernfalls räumlich versetzt sind. Die Aufteilung des einfallenden Lichtstroms erfordert eine ausreichende Beleuchtung, um alle vier Kanäle mit der notwendigen Lichtmenge zu versorgen.

5.1.2 Objektiv

Als Objektiv kommt ein sogenanntes „long distance microscope“¹³ (LDM) zum Einsatz. Mit der Kamera erlaubt es eine Auflösung bis $5\text{ }\mu\text{m/px}$ aus einer Entfernung von bis zu 120 mm. Damit ist es möglich, Objektiv und Kamera außerhalb der Einhausung zu betreiben. Abbildung 5.2 zeigt die Bildverstärkerkamera und das Objektiv am Versuchsstand. Der Steuerrechner der Kamera befindet sich im Tisch. Dessen Konstruktion erlaubt zudem eine genaue Justierung der Kamera in jede Raumrichtung [Web13*].

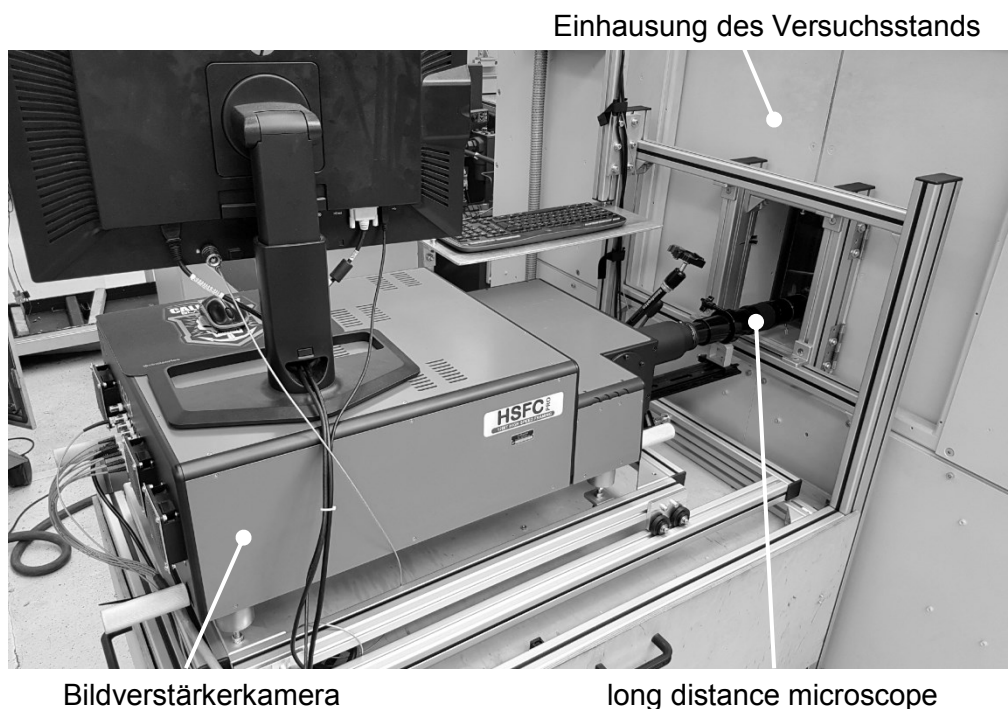


Abbildung 5.2 Bildverstärkerkamera und long distance microscope am Versuchsstand.

5.1.3 Beleuchtungslaser

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen benötigen eine starke Lichtquelle aufgrund der kurzen Belichtungszeiten. Zudem tritt während der Kollision das charakteristische, weiße Prozessleuchten auf. Es würde zu einer Überbelichtung der Aufnahmen im relevanten Bereich der Kollision führen und somit dessen Beobachtung verhindern. Dieses weiße Prozesslicht strahlt im gesamten sichtbaren Spektralbereich [Roe14*], sodass eine weiße Lichtquelle

¹³ Mikroskop mit besonders großer Gegenstandsweite, siehe Kapitel 13: Glossar

für die Kamera sehr hell sein müsste oder andernfalls das Prozesslicht nicht überstrahlen könnte. Bei der Beobachtung des konventionellen Lichtbogenschweißens wird diese Herausforderung dadurch gelöst, dass eine monochromatische Lichtquelle genutzt wird. Sie konzentriert ihre Leistung auf einen schmalen Spektralbereich und überstrahlt dort das weiße Prozesslicht [Oxf01]. Die Kamera benötigt dabei einen optischen Bandpassfilter, der nur für diesen Spektralbereich durchlässig ist.

Der eingesetzte gepulste Beleuchtungslaser „Cavilux SMART“ von Cavitar besitzt eine Leistung von 400 W bei einer Wellenlänge von 640 nm. Die maximale Pulsdauer beträgt 10 μ s, was für die Prozessdauer ausreichend ist. Bei längeren Aufnahmen lässt sich diese Zeitspanne auch in mehrere, kürzere Lichtpulse mit zwischenliegenden Pausen aufteilen. Die Halbleiterquelle emittiert einen divergenten Lichtstrahl, um in einen optischen Leiter einkoppeln zu können. Dieser beseitigt zusätzlich die Kohärenz, sodass keine Flecken bei der Belichtung auftreten, die sogenannten Speckles. Sie haben ihren Ursprung in der destruktiven beziehungsweise konstruktiven Interferenz bei der Reflexion von kohärentem Laserlicht auf unebenen Oberflächen. Dies wäre beispielsweise auf den rauen Schnittkanten der Proben der Fall. Die Optik wird in den Versuchen auf einen Leuchtfleck von etwa 15 mm Durchmesser eingestellt, sodass die Modellversuchsproben vollständig ausgeleuchtet werden. Die Beleuchtung erfolgt sowohl von vorne aus Richtung der Kamera als auch von hinten durch den sich schließenden Spalt direkt in die Kamera. In letzterem Fall wird der Schatten des Prozesses aufgezeichnet.

5.1.4 Beleuchtungsmodi

Für die Prozessbeobachtung stehen prinzipiell die beiden Beleuchtungsmodi Auflicht und Durchlicht zur Wahl. Bei Aufnahmen im Auflicht, wie in Abbildung 5.3 links gezeigt, kann die Oberfläche der Probenseiten problematische Reflexionen hervorrufen, die das Bild stören. Diese Aufnahmemethode ermöglicht es jedoch, die durch das Material laufenden Schockwellen zu vermessen [Pos16*] und weitere Effekte außerhalb der Fügezone zu studieren. Die Optik des Beleuchtungslasers befindet sich dabei direkt neben dem Kameraobjektiv.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist die Durchlichtbeleuchtung von größerem Interesse. Dabei ist die Optik der Laserlichtquelle von der Kamera aus gesehen hinter den Proben angebracht und mit einer Streuscheibe versehen. Die Kamera filmt also die Kontur des Prozesses vor einem hellen Hintergrund. Aufgrund der geringen Tiefe der Proben von nur 12 mm ist die fehlende parallele Strahlführung kein Hindernis. Bei den Aufnahmen im Durchlicht ist der Jet erkennbar, ebenso die Druckwellen im Umgebungsmedium im sich schließenden Spalt. In Abbildung 5.3 rechts ist zusätzlich über der oberen Probe die Druckwelle erkennbar, die sich von der Oberfläche nach dem Durchheilen der Schockwelle vom Aufprall durch die Probe löst. Die Durchlichtaufnahmen vereinfachen aufgrund des höheren Kontrasts zwischen den Proben und dem hellen Hintergrund die Vermessung des Aufprallwinkels sowie des Jets. Ein Glaslineal dient hierbei zur einmaligen Kalibrierung vor der Versuchsreihe.

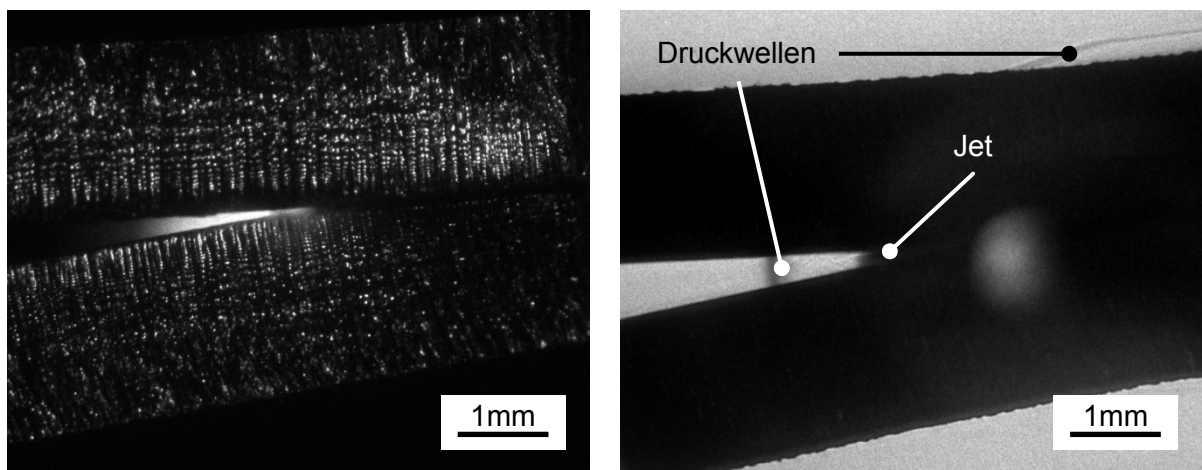


Abbildung 5.3 Links: Auflichtaufnahme, die Kanten sind lasergeschnitten. Rechts: Durchlichtaufnahme mit Schockwellen im Fügespalt und an der Oberseite.

Beim elektromagnetischen Pulsschweißen liefert die Durchlichtaufnahme ebenfalls die meisten Informationen. Hier führt die deutlich größere Tiefe der Proben von 40 mm allerdings zu Besonderheiten, die bei der Auswertung beachtet werden müssen. Dies sind maßgeblich die perspektivische Abbildung des Fügespalts sowie die daraus resultierenden Reflexionen, hauptsächlich des Jets. In Abbildung 5.4 ist der Bildausschnitt gezeigt. Es handelt sich dabei um die Frontalansicht einer Probe, wie sie auch in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

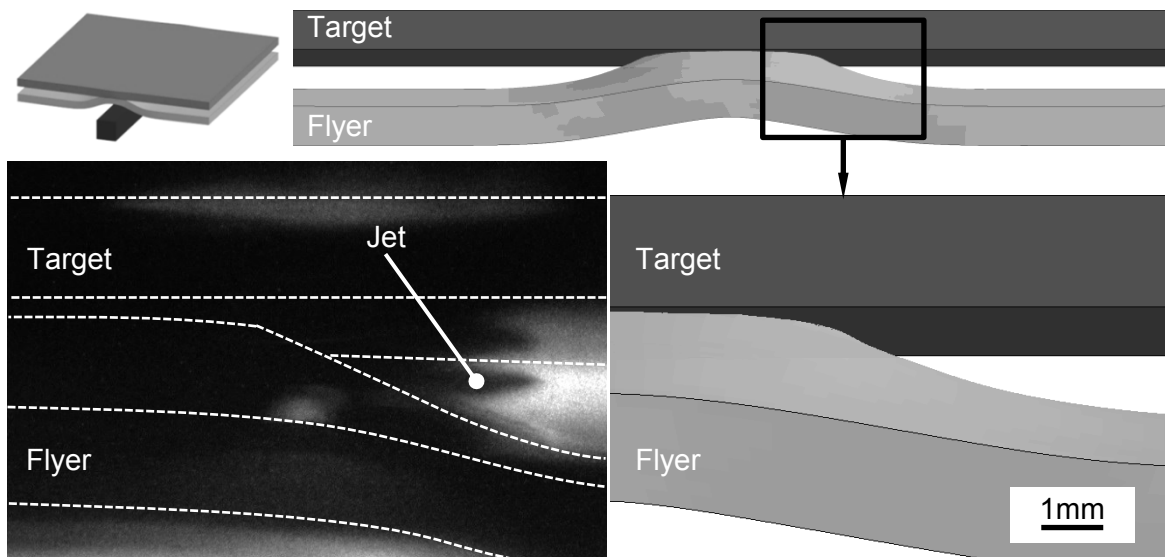


Abbildung 5.4 Links: Durchlichtaufnahme des elektromagnetischen Pulsschweißens. Oben und rechts: Schematische Darstellung.

Zur besseren Orientierung ist in Abbildung 5.4 oben die Frontalansicht auf eine Fügeprobe dargestellt. Rechts ist der vergrößerte Ausschnitt gezeigt, der dem Sichtfeld der Kamera entspricht. Links in der Aufnahme der Kamera sind die Konturen von Flyer und Target hervorgehoben. Aufgrund der Reflexion auf der Oberfläche des Targets erscheint der Jet doppelt.

5.2 Quasistatische Prozessbeobachtung

In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird das Prozessleuchten zugunsten der besseren Beobachtbarkeit zwar ausgeblendet, es ist jedoch für weitere Untersuchungen von Interesse. Es wird daher mit einer Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv erfasst. Sie ist auf den Kollisionspunkt fokussiert und wird manuell kurz nach dem Beginn des Anlaufs der Rotoren ausgelöst. Die Belichtungszeit beträgt zwei Sekunden, sodass das Prozesslicht in jedem Fall aufgenommen wird. Die übrigen Parameter, Blende und Empfindlichkeit, werden entsprechend für eine ausgewogene Belichtung gewählt und sind immer identisch. Damit sind alle Aufnahmen im Rahmen dieser Arbeit vergleichbar. Der Bereich um die Kamera wird zusätzlich abgedunkelt, damit die Aufnahme nicht überbelichtet wird. Eine beispielhafte Aufnahme ist in Abbildung 5.5 gezeigt und beschrieben.

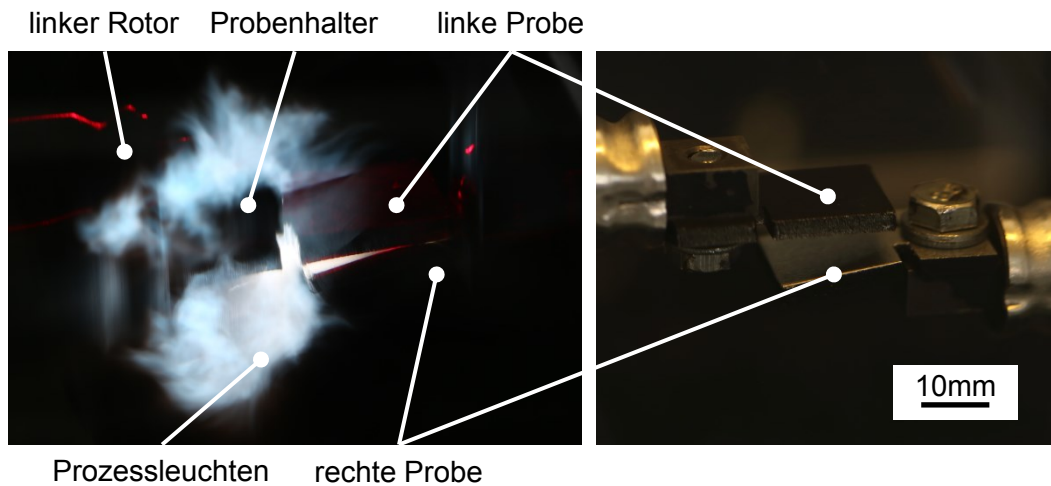


Abbildung 5.5 Aufnahme des Prozessleuchtens, das sich nach der Kollision ausbreitet (F/11, ISO-100, 100 mm Brennweite). Rechts: der selbe Bildausschnitt vor dem Versuch zur besseren Darstellung.

Auf diesen Fotos ist auch immer das rote Licht des BeleuchtungsLasers zu sehen. Dies stellt für die Auswertung der Aufnahmen jedoch keine Schwierigkeit dar. Die definierte Pulsdauer des Laserlichts ermöglicht es sogar, anhand der Bewegungsunschärfe der Reflexion des Laserlichts an Oberflächen eine Aussage über deren Geschwindigkeiten zu treffen. Die Länge der Reflexion entspricht daher der zurückgelegten Strecke innerhalb der Pulsdauer, die bei den Versuchen in der Regel bei $10\ \mu\text{s}$ liegt.

Der Einsatz der Methode ist beim elektromagnetischen Pulsschweißen weniger praktikabel. Zum einen ist aufgrund der starken elektromagnetischen Felder ein größerer Abstand zu der Fügezone einzuhalten, weshalb weniger Details aufgenommen werden können. Zudem ist das Prozesslicht aufgrund der potentiell längeren Fügezone auch intensiver, sodass es überstrahlt und so die Interpretation erschwert wird.

5.3 Temperaturmessung nach dem Versuch

Die Messung der örtlichen und zeitlichen Temperaturentwicklung während der Kollision ist ohne größeren Aufwand nicht möglich. In dieser Arbeit soll es die Extrapolation des wenige Sekunden nach der Kollision gemessenen Temperaturverlaufs der gesamten Probe ermöglichen, deren Temperatur im Moment nach der Kollision abzuschätzen. Die so ermittelte

Temperaturerhöhung erlaubt die Berechnung der notwendigen zugeführten Energiemenge. Außerdem sind damit Abschätzungen der Temperatur unmittelbar in der Fügezone möglich.

Der Analogieversuch bietet grundsätzlich bessere Voraussetzungen im Vergleich zu den Realprozessen Sprengschweißen und elektromagnetisches Pulsschweißen. Die den Probekörpern zugeführte kinetische Energie ist durch die Drehzahl vorgegeben und lässt sich sehr genau bestimmen. Bei beiden Realprozessen erfolgt unter anderem durch den Sprengstoff beziehungsweise durch die Wirbelströme ein zusätzlicher Wärmeeintrag, der abgeschätzt werden müsste und somit eine große, zusätzliche Ungenauigkeit darstellt. Zudem sind die Fügepartner nach der Kollision immer im Kontakt mit einer massiven Unterlage, durch die die Wärmeenergie undefiniert abfließt.

5.3.1 Durchführung und Berechnung

Um Rückschlüsse auf die Temperatur der Probekörper und damit indirekt in deren Fügezone während der Kollision ziehen zu können, wird der Temperaturverlauf der Probe nach erfolgter Kollision und Abtrennung von den Probenhaltern gemessen. Die Aufzeichnung der Wärmebildkamera wird allerdings bereits im Moment der Kollision manuell gestartet. Zum Einsatz kommt die Wärmebildkamera S65 der Firma FLIR mit Makroobjektiv. Vor dem Versuch werden die beiden Probekörper auf der der Kollision abgewandten Seite matt schwarz lackiert, da der Emissionskoeffizient der walzblanken Oberfläche zu gering ist (Abbildung 5.6).

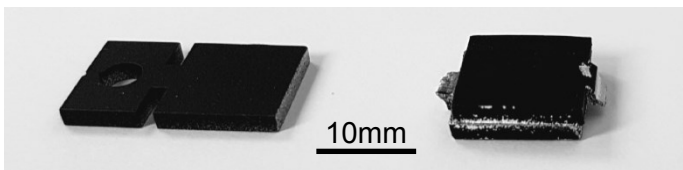


Abbildung 5.6 Links: Einseitig schwarz lackierte Probe vor dem Versuch. Rechts: gefügte Probe nach dem Versuch.

Vor der Versuchsdurchführung erfolgt eine Referenzmessung der Ausgangstemperatur mit der Wärmebildkamera an beiden bereits mit den Probenhaltern verschraubten Proben. Aufgrund unterschiedlicher Umgebungstemperaturen während einer Versuchsreihe an einem Tag kommt es hier andernfalls zu Abweichungen.

Nach der Kollision kommt die gefügte Probe beziehungsweise kommen die beiden nicht gefügten Proben innerhalb der Einhausung im Fangnetz zum Liegen. Dort müssen sie gefunden werden, bevor die eigentliche Erfassung der Oberflächentemperatur beginnen kann. Im Falle nicht verbundener und mit der lackierten Fläche nach unten liegender Proben müssen diese zusätzlich gedreht werden. Der Beginn der Erfassung der Probentemperatur liegt also immer einige Zeit nach dem Beginn der Aufzeichnung. Die Zeitspanne beträgt typischerweise wenige Sekunden, im Einzelfall jedoch bis über zehn Sekunden. Die Auswertung zeigt allerdings, dass durch diese Schwankung keine feststellbare Abweichung in den Ergebnissen entsteht. In den errechneten Werten lässt sich keine Korrelation zwischen Verzögerung und Temperatur feststellen. Die Schwankungen, die sich aus dem manuellen Start der Wärmebildaufnahme ergeben, werden in Abschnitt 5.3.4 berücksichtigt. Abbildung 5.7 zeigt das Kamerabild einer Probe auf der Unterlage unmittelbar nach Beginn der Erfassung ihrer Temperatur.

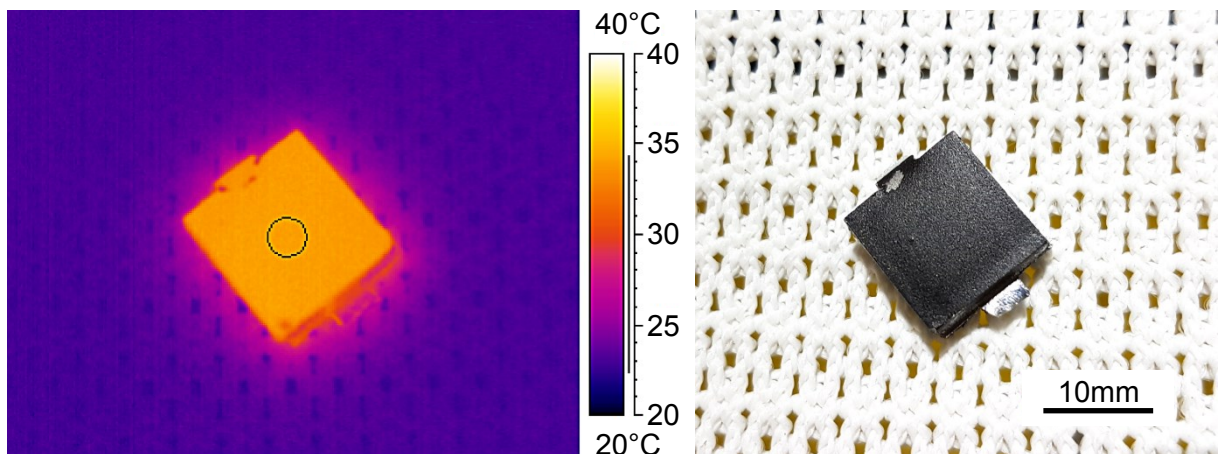


Abbildung 5.7 Links: Aufnahme mit der Wärmebildkamera von einer gefügten Probe unmittelbar nach der Kollision im Fangnetz. Rechts: Foto der selben Probe.

Während der nächsten zweieinhalb Minuten wird die Temperaturverteilung gemessen. Während dieser Zeit muss sich die Probe für die spätere Auswertung immer an derselben Stelle im Bildausschnitt befinden.

Die Auswertung erfolgt mit der Software „ThermaCam Researcher Pro“. Ein kreisförmiger Messbereich von etwa 3 mm Durchmesser wird in die Probenmitte gelegt und dessen örtlich gemittelter Temperaturverlauf ausgelesen, um das Rauschen bereits zu Anfang zu glätten. Links in Abbildung 5.7 ist dieser Bereich als Kreis auf der Probenoberfläche

dargestellt. Ein beispielhafter Temperaturverlauf ist in Abbildung 5.8 gezeigt. Der auswertbare Bereich beginnt aufgrund der Suche der Probe in der Einhausung hier erst nach etwa zwölf Sekunden. Da die Wärmebildkamera danach von Hand gehalten wird, sind Abweichungen möglich, wenn der Auswertebereich im Bild kurzzeitig die beschichtete Oberfläche der Probe verlässt. Diese einzelnen Messwerte sowie die Messwerte am Anfang und am Ende werden bei der nachfolgenden Extrapolation daher nicht berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgt keine zusätzliche Aufbereitung der Messdaten.

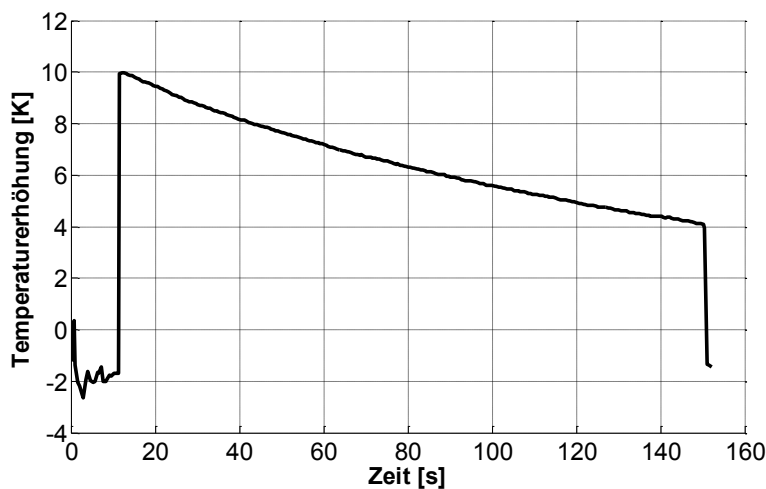


Abbildung 5.8 Gemessener Temperaturverlauf im Messbereich auf der Probenoberfläche. Der auswertbare Bereich beginnt bei 12,2 s.

Die vertrauenswürdigen Messpunkte werden in der „curve fitting toolbox“ von MathWorks MATLAB mit dem doppelt exponentiellen Ansatz in Formel 5.1 angenähert. Dies ist der Verlauf der Temperatur T über der Zeit t .

$$T(t) = a \cdot e^{b \cdot t} + f \cdot e^{g \cdot t} \quad (5.1)$$

Dem liegt die Abschätzung zugrunde, dass die Wärmeleitung in die Unterlage sowie die freie Konvektion den größten Anteil ausmachen und die Wärmestrahlung aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zur Umgebung keinen signifikanten Einfluss hat. Die Parameter für die zweite Exponentialfunktion zeigen im Vergleich zu denen der ersten Exponentialfunktion bereits, dass eine weitere dritte kaum noch einen Einfluss hat. Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft Messdaten mit einem darübergelegten, doppelt exponentiellen und einfach exponentiellen Ansatz.

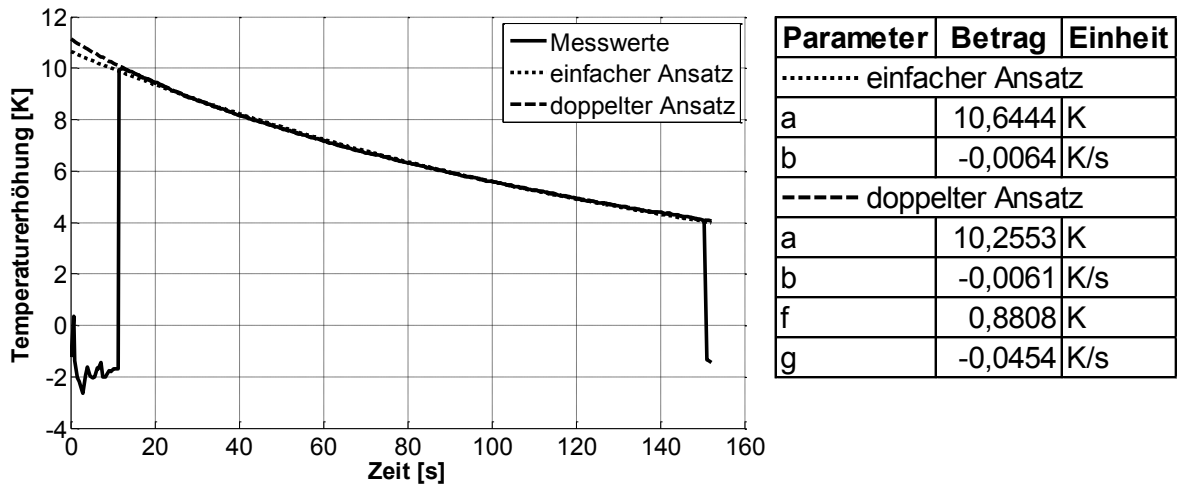


Abbildung 5.9 Links: Gemessener Temperaturverlauf, einfach exponentieller Fit und doppelt exponentieller Fit. Rechts: Berechnete Funktionsparameter.

Wie in Abbildung 5.9 angedeutet, wird im Anschluss die Temperatur zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ extrapoliert, was der Summe der Parameter a und f in der Ansatzfunktion (Formel 5.1) entspricht.

5.3.2 Berechnung des Energieeintrags¹⁴

Die gemessene und auf den Kollisionszeitpunkt rückgerechnete Temperaturerhöhung ΔT der gesamten Probe wird hervorgerufen durch einen Energieeintrag ΔE . Dessen Betrag lässt sich mithilfe der Probemasse sowie der jeweiligen Wärmekapazität des Werkstoffes gemäß Formel 5.2 berechnen.

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Für die Berechnung werden die Werte in Tabelle 5.1 für die spezifische Wärmekapazität c und die Masse m einer Probenhälfte genutzt. Zum besseren Verständnis ist außerdem der konstante Faktor $c \cdot m$ für eine Probenhälfte des jeweiligen Werkstoffes angegeben. Je nach Werkstoffkombination wird der Faktor der gesamten Probe durch Addition der Faktoren der Probenhälften berechnet. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass die Wärmekapazitäten unabhängig von der Temperatur sind.

¹⁴ in den Prozess unbewusst eingetragene, nicht direkt quantifizierbare Energie, siehe Kapitel 13: Glossar

Tabelle 5.1 Parameter für Gleichung 5.2

	Aluminium EN AW-1050A	Kupfer 2.0060	Stahl DC01
Spezifische Wärmekapazität c	$899 \frac{J}{kgK}$	$386 \frac{J}{kgK}$	$450 \frac{J}{kgK}$
Masse einer Probenhälfte m	$0,788g$	$1,302g$	$1,146g$
Faktor $c \cdot m$	$0,708 \frac{J}{K}$	$0,503 \frac{J}{K}$	$0,516 \frac{J}{K}$

5.3.3 Korrekturen

Die so berechnete Temperaturerhöhung beziehungsweise der Energieeintrag in die Proben beinhaltet mehrere Komponenten, die im Folgenden identifiziert, untersucht und quantifiziert werden müssen. Denn in der Realität ist der Prozess zahlreichen Umwelteinflüssen unterworfen, die den tatsächlichen Energieeintrag verfälschen und daher vom Prozess getrennt werden müssen. Dazu wird eine Systemgrenze um die Versuchsproben gelegt. Sie durchschneidet dabei, wie in Abbildung 5.10 angedeutet, die Sollbruchstellen in der Mitte. Es handelt sich im Wesentlichen um den ersten Hauptsatz der Thermodynamik, bei dem die Energieflüsse betrachtet werden. Der daraus bestimmte Energieeintrag in die Proben im Versuch lässt sich dann im folgenden Kapitel 6 direkt mit den theoretischen Werten vergleichen, bei deren Berechnung nur die kinetische Energie der Proben relevant ist.

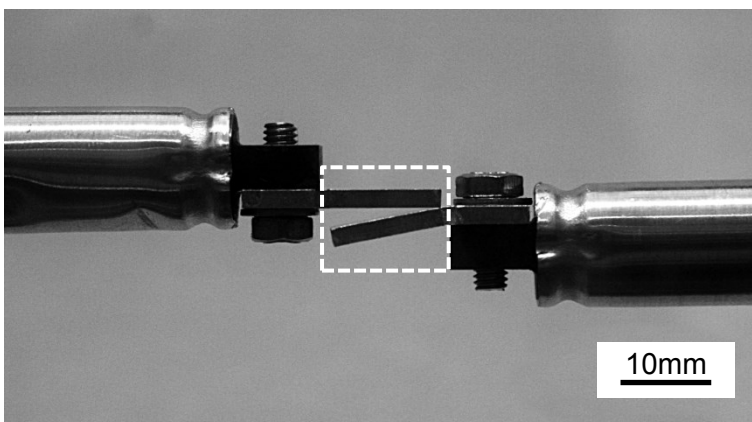


Abbildung 5.10 Lage der Systemgrenze für den ersten Hauptsatz für die Versuchsproben.

1. Ausgangstemperatur

Die Ausgangstemperatur beider Proben wird unmittelbar vor der Versuchsdurchführung mit der Wärmebildkamera erfasst. Umwelteinflüsse wie die Umgebungstemperatur oder systematische Fehler in der Messtechnik bleiben daher ohne Auswirkung.

2. Gasreibung

Messungen vor und nach Versuchsdurchläufen mit Aluminiumproben ohne Kollision zeigen, dass sich die Temperatur der Proben durch die Reibung mit der Luft bei einer Drehzahl von 5000 1/min um etwa 0,8 K erhöht. Dies entspricht einer zugeführten Energie von etwa 1,1 J. In der gleichen Größenordnung liegen auch die Kupfer- und Stahlproben mit jeweils 1 mm Dicke. Bei den Versuchen unter einer anderen Gasatmosphäre ist dieser Korrekturwert hingegen nicht mehr gültig. Er wird im nächsten Schritt bestimmt.

3. Nachkollisionen

Nachdem sich die Proben an der Sollbruchstelle von den Probenhaltern gelöst haben, bewegen sie sich zunächst mit einer Restgeschwindigkeit unkontrollierbar in der Einhausung. Dabei kollidieren sie teilweise mit den abbremsenden Rotoren oder der Einhausung, bevor sie im Fangnetz zum Liegen kommen. Dadurch werden nicht nur die Rotoren deformiert, sondern auch die Proben selbst, wie Abbildung 5.11 beispielhaft zeigt.

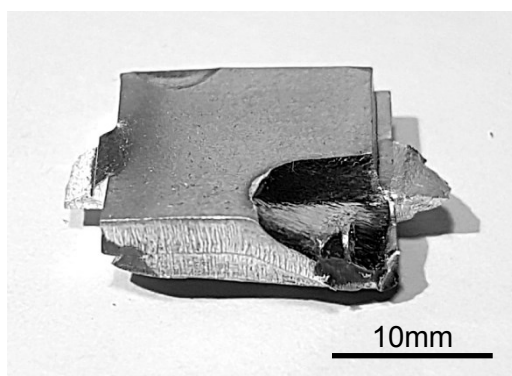


Abbildung 5.11 Gefügte Probe mit einer Delle durch eine Nachkollision mit einem Rotor.

Diese plastische Deformation stellt einen weiteren Energieeintrag in die Proben dar und führt, wenn sie nicht beachtet wird, zu großen Streuungen der Auswertung. Abbildung 5.12 links zeigt den durchschnittlichen Energieeintrag

mit Streubalken aus einer Versuchsreihe, bei der die Deformation nicht berücksichtigt worden ist. Zur Kompensation wird die Größe der Deformation abgeschätzt. Im häufigsten Fall einer Delle ist das deren Volumen. In Abbildung 5.12 (Mitte) ist aus Versuchen der ermittelte Energieeintrag in Abhängigkeit dieses abgeschätzten Volumens aufgetragen. Eine Ausgleichsgerade verdeutlicht, dass hier in guter Näherung ein linearer Zusammenhang besteht. Für Aluminium EN AW-1050A beträgt der resultierende Korrekturfaktor etwa $0,389 \text{ J/mm}^3$ für den Zustand H18, etwa $0,155 \text{ J/mm}^3$ für den Zustand H14 und für das ebenfalls untersuchte Kupfer (2.0060) beträgt er näherungsweise $0,684 \text{ J/mm}^3$. Für Stahl liegt aufgrund der geringeren Versuchsanzahl kein experimentell abgesicherter Faktor vor. Durch die Kompensation sind die scheinbaren Streuungen aus den Messungen deutlich reduziert, wie Abbildung 5.12 rechts zeigt.

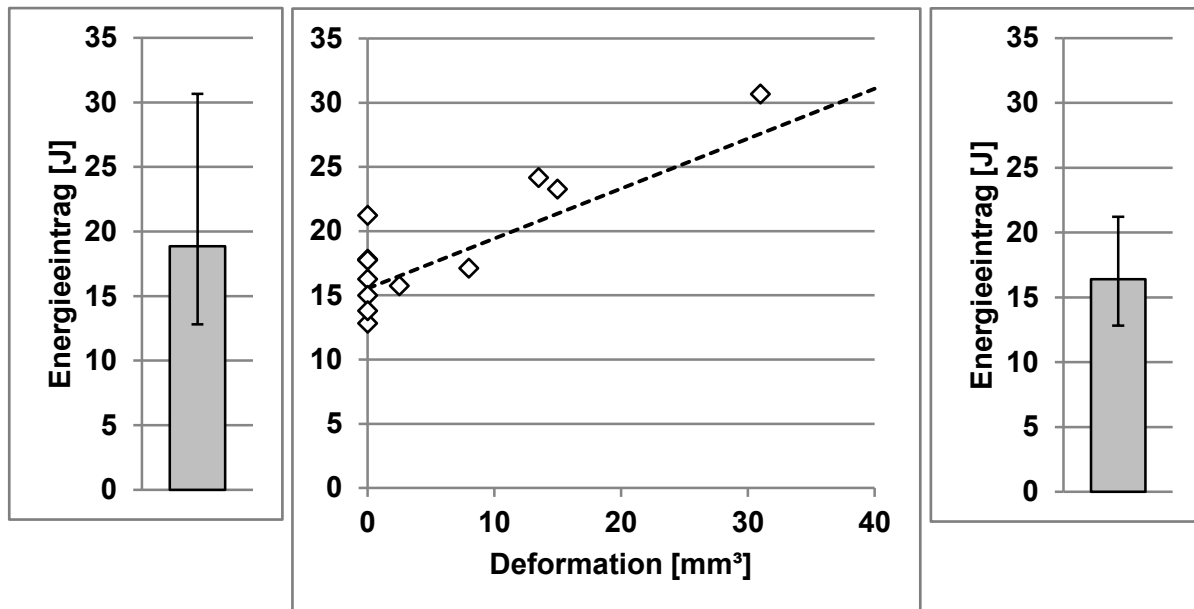


Abbildung 5.12 Betrag des Energieeintrags ohne Einbezug der plastischen Deformation durch Nachkollisionen (links), die Korrelation zwischen deformiertem Werkstoffvolumen und Energieeintrag (Mitte) und dem entsprechend bereinigten Energieeintrag (rechts).

4. Abkühlung durch expandierendes Gas

In einigen Versuchen wird die Umgebungsluft ausgetauscht, um Schweißversuche unter inerter Gasatmosphäre durchzuführen. Die Proben werden allerdings bereits vorher installiert und die Referenztemperatur gemessen. Das Gas kommt direkt aus der Vorratsflasche und erreicht durch die Expansion im Druckminderer Temperaturen unter 0°C . Dieser Vorgang

dauert aufgrund des vergleichsweise großen Volumens der Einhausung und der geringen Dichtigkeit typischerweise um fünf Minuten. In dieser Zeit nimmt die Temperatur der Proben ab. Auch die Temperaturänderung der Proben während des Hochlaufs ändert sich. Referenzmessungen nach einem Gasaustausch mit einem anschließenden vollen Bewegungsablauf der Rotoren ohne Kollision zeigen, dass sich die Proben um etwa 0,8 K abkühlen. Dies entspricht einer abgeführten Energie von etwa 1,1 J.

5.3.4 Annahmen

Für die Auswertung werden zusätzlich die folgenden Annahmen getroffen. Sie orientieren sich ebenfalls an der Systemgrenze aus Abbildung 5.10.

1. Das Positionieren der Probe von Hand für die Wärmebildkamera führt zu keinem signifikanten Energieverlust.

Je nach Lage der Probe im Fangnetz ist es oft notwendig, sie händisch an eine für die Wärmebildkamera besser zugängliche Stelle zu bringen. Durch eine möglichst kurze Berührdauer an den Ecken wird dieser Einfluss minimiert, sodass eine Vernachlässigung vertretbar ist. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Probentemperaturen immer im Bereich um die Körpertemperatur liegen und auch daher kein relevanter Energieverlust zu erwarten ist.

2. Der Wärmedurchgang über die Sollbruchstelle ist vernachlässigbar.

Das Versagen der Sollbruchstellen beginnt etwa 4 μs nach dem ersten Kontakt und ist nach etwa 28 μs abgeschlossen. Je nach Kollisionsgeschwindigkeit und Kollisionswinkel ändern sich diese Werte, liegen jedoch immer im Mikrosekundenbereich. Der Wärmetransport durch die Sollbruchstelle ist zwar praktisch vorhanden, jedoch in seiner Größenordnung nicht relevant.

3. Der Energieeintrag aus dem Versagen der Sollbruchstelle ist vernachlässigbar.

Durch die plastische Deformation der Sollbruchstelle trägt die dabei dissipierte Energie zur Temperaturerhöhung bei. Ihr Beitrag führt jedoch nur zu einem vernachlässigbar kleinen Energieeintrag unter 0,1 J und wird daher nicht berücksichtigt. Zugrunde liegt die analytische Abschätzung, dass das Versagen nach einer Dehnung der Sollbruchstelle in Probenlängsrichtung von 10 % eintritt.

4. Die an der Oberfläche der Probe gemessene Temperatur entspricht der Temperatur im Inneren.

Da die Erfassung der Probe mit der Wärmebildkamera erst einige Sekunden nach der Kollision beginnt, spielen transiente Effekte während der Homogenisierung der Temperatur innerhalb der Probe keine Rolle. Die matte Beschichtung der Probe ist zudem ausreichend dünn, sodass hier kein signifikanter Temperaturgradient zwischen der Oberfläche und dem Inneren der Probe besteht. Dieser Temperaturgradient würde ohnehin dazu führen, dass die Probentemperatur tendenziell unterschätzt, also eine geringere Temperatur als die tatsächlich vorliegende gemessen wird.

5. Abweichungen beim Farbauftrag beeinflussen das Ergebnis nicht.

Der Auftrag der schwarzen Sprühfarbe erfolgt händisch, sodass hier Abweichungen bei Schichtdicke und Gleichmäßigkeit zu erwarten sind. Eine zu dünne Schicht kann beispielsweise dazu führen, dass die Aluminiumoberfläche bei den Messungen durchscheint und die Ergebnisse damit aufgrund der Reflexion abhängig von der Blickrichtung der Kamera sind. Bei der Versuchsdurchführung kann nicht immer gewährleistet sein, dass sie im exakt gleichen zeitlichen Abstand zum Farbauftrag stattfinden. Außerdem sind die Umgebungsbedingungen wie beispielsweise die Temperatur nicht immer identisch. Daher kann die Oberfläche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Diese Abweichungen werden durch die Referenzmessungen der Temperatur vor jedem Versuch jedoch kompensiert.

6. Durch den schwankenden Startzeitpunkt der Wärmebildaufzeichnung ergeben sich keine relevanten Abweichungen.

Die Aufzeichnung der Wärmebildkamera wird manuell zum Zeitpunkt der Kollision der Proben gestartet. Aufgrund der menschlichen Reaktionszeit beginnt die Aufzeichnung im Durchschnitt etwa 0,2 s später. Der Temperaturverlauf müsste also weiter in die Vergangenheit und damit zu höheren Werten extrapoliert werden. Die ermittelte Temperatur bei der Extrapolation wird die reale Temperatur daher unterschätzen. Aus den Kurvenparametern in Abbildung 5.9 ergibt sich zudem ein Temperaturgradient zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ von nur etwa -0,1 K/s, also nur etwa -0,14 J/s.

7. Der Wärmeverlust während der Flugphase der Proben nach der Kollision ist nicht relevant.

Wenn die Kollision erfolgt ist und sich die Proben an der Sollbruchstelle von den Probenhaltern gelöst haben, gehen sie in eine freie Flugphase über, bevor sie im Fangnetz aufgehalten werden. Während dieser Flugphase in der Einhausung geben die Proben durch erzwungene Konvektion Wärme an die Umgebungsluft ab. Diese Flugphase ist deutlich kürzer als eine Sekunde, da der Weg bis zum Fangnetz nur etwa 0,5 m beträgt und sich die Proben mit einer Geschwindigkeit um 10 m/s bewegen. Sie sind dabei mit bloßem Auge nicht zu beobachten, aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durch das Sichtfenster in der Einhausung ist jedoch die Abschätzung möglich. In den ersten etwa 100 ms findet noch der Temperatúrausgleich innerhalb der Probe statt, wie die numerische Simulation zeigt. Somit wächst der Energieverlust durch einen Temperaturgradient zwischen Probenoberfläche und Umgebungsluft erst allmählich an. Dieser Anteil wird daher als vernachlässigbar klein angenommen. Außerdem führt er dazu, dass die Probentemperatur zum Zeitpunkt null eher unterschätzt wird, also in der Realität etwas höher ausfällt.

8. Der Energieverlust durch Jet, Licht und ausgestoßenes Gas ist vernachlässigbar.

Mit dem ausgestoßenen Grundmaterial, dem Jet, verlässt auch Energie die Probe und damit die Systemgrenze. In den dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuchen ist die Masse des Jets gering. Ein Massendefekt lässt sich nach dem Versuch mit einer Messgenauigkeit von ± 1 mg nicht feststellen. Daher kann dieser Anteil unberücksichtigt bleiben. Mit dem Prozesslicht während der Kollision verlässt zudem Strahlungsenergie die Proben. Daneben wird außerdem ein Teil der kinetischen Energie der beiden Fügepartner genutzt, um das zwischenliegende Umgebungsmedium aus dem sich schließenden Spalt zu beschleunigen und dabei zu komprimieren. Das komprimierte, heiße Gas verlässt den Spalt und damit die Systemgrenze mit der in ihm gespeicherten Energie. Dieser Anteil und die Strahlungsenergie können ebenfalls als vergleichsweise gering angesehen werden und bleiben unberücksichtigt. Durch diese getroffenen Vereinfachungen wird die Temperatur bei der Auswertung der Versuche tendenziell unterschätzt.

5.3.5 Bewertung der Messmethode

Der Vorteil des beschriebenen Vorgehens liegt darin, dass es unabhängig von vielen Umgebungseinflüssen ist. So ist beispielsweise nicht relevant, wie groß der Wärmeübergang in die Umgebung ist. Die Extrapolation erfolgt ausgehend von der Kurvenanpassung, sodass ein unterschiedlicher Temperaturgradient automatisch berücksichtigt wird. Da es sich um eine Differenzmessung vor und nach dem Versuch in kurzem zeitlichem Abstand handelt, entfallen außerdem die Einflüsse von Störgrößen aus der Umgebung. Allerdings müssen für die Energiebilanz trotzdem einige Einflussgrößen berücksichtigt werden. Dazu gehört beispielsweise der Energieeintrag in die Proben durch die Luftreibung. Durch entsprechende Versuche können diese Einflüsse quantitativ ausreichend genau bestimmt werden. Wo dies nicht möglich ist, helfen konservative Abschätzungen, was bei den späteren Auswertungen und Interpretationen allerdings berücksichtigt werden muss. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die nicht quantifizierbaren Einflüsse auf die Ergebnisse entweder vernachlässigbar sind oder dazu führen, dass die errechneten Temperaturwerte die realen Temperaturwerte zum Zeitpunkt null unterschätzen werden. Der tatsächliche Energieeintrag in die Probe liegt also in der Realität höher als der gemessene und rückgerechnete Energieeintrag.

5.4 Zusammenfassung

Für die Arbeit am Versuchsstand stehen angepasste Technologien zur Prozessbeobachtung zur Verfügung. Dazu gehören die Fotografie des Prozessleuchtens mittels einer Spiegelreflexkamera sowie die zeitlich und örtlich hoch aufgelöste Erfassung des Kollisionsbereichs mittels Bildverstärkerkamera. Die Messung des Temperaturverlaufs einer Probe nach der Kollision mittels Wärmebildkamera wird genutzt, um daraus die während des Prozesses zugeführte Energiemenge zu berechnen. Dabei werden Annahmen getroffen, um unbekannte Einflussfaktoren konservativ abzuschätzen. Zudem werden Umgebungseinflüsse, die die Messung verfälschen, berücksichtigt und herausgerechnet. Für das elektromagnetische Pulsschweißen ist nur die Beobachtung mittels Bildverstärkerkamera umsetzbar.

6 Auswertung des Energieeintrags

Am Versuchsstand werden Versuche mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Im Anschluss werden für die Versuche, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, die jeweiligen Temperaturerhöhungen der Probe durch den Prozess ermittelt. Dabei sind verfälschende Umgebungseinflüsse bereits berücksichtigt. Die für diese Temperaturerhöhung notwendige Energiemenge, die in die Probe während des Prozesses eingetragen worden sein muss, wird über die spezifische Wärmekapazität berechnet. Dieser aus dem Experiment berechnete Energieeintrag wird mit dem theoretischen Maximalbetrag verglichen, der der Probe ausschließlich über die kinetische Energie zugeführt wird.

Die Differenz hat ihre Ursache in bislang unbekannten Wirkzusammenhängen, die in diesem und den folgenden Kapiteln identifiziert werden. Es wird dabei nicht nur die makroskopische Energiebilanz der gesamten Probe betrachtet. Auch die mikroskopische Temperaturentwicklung in der Fügezone wird davon ausgehend abgeschätzt und diskutiert.

6.1 Abschätzung der Energiezufuhr¹⁵ im Analogieversuch

Aus der Differenz der kinetischen Energie der Probenkörper vor und nach der Kollision lässt sich die theoretisch maximal mögliche Energiezufuhr berechnen. Dabei wird berücksichtigt, dass nicht die gesamte kinetische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. In der Realität wird ein Teil der Energie durch die plastische Deformation beim Aufprall als potentielle Energie im Werkstoff gespeichert. Dieser Wert ist materialabhängig und liegt typischerweise im Bereich um 10 % [Eng13] [Far25]. Durch diese konservative Abschätzung wird die theoretisch maximal mögliche Energiezufuhr in die Probe tendenziell überschätzt.

¹⁵ dem Prozess bewusst zugeführte, quantifizierbare Energie, siehe Kapitel 13: Glossar

Die kinetische Anfangsenergie $E_{kin,0}$ unmittelbar vor der Kollision der Fügepartner wird ausschließlich aus der Umlaufgeschwindigkeit der Proben berechnet. Die überlagerte Drehung um die eigene Achse mit der Drehzahl des Rotors ist in ihrer Größenordnung nicht relevant, sie beträgt beispielsweise für Aluminiumproben nur etwa 3 mJ.

Die kinetische Restenergie $E_{kin,1}$ nach der Kollision setzt sich zusammen aus einer rotatorischen Komponente um die Hauptträgheitsachse der Probe sowie einer translatorischen Komponente. Durch die vergleichsweise geringe Anzahl der möglichen Kamerabilder sind die Geschwindigkeiten experimentell nur grob zu bestimmen. Die numerische Simulation ermöglicht hier genauere Untersuchungen. In dem Moment, während die Kollision beginnt, besitzen die Proben jeweils noch ihre Umlaufgeschwindigkeit sowie eine Rotationsgeschwindigkeit, die der Rotordrehzahl entspricht. Nach der vollständigen Kollision verbleibt davon nur noch eine geringe Rotationsgeschwindigkeit um die eigene Achse, die translatorische Komponente ist etwa null. Die numerische Simulation zeigt, dass diese kinetische Restenergie etwa 4 - 5 % der gesamten Energie beträgt. Dieser Wert ist unabhängig davon, ob eine Verbindung eintritt oder nicht. Die kinetische Energie wird anschließend im Fangnetz abgebaut. Dabei ist allerdings nicht sicher, zu welchem Anteil diese Energie zu einer Erwärmung der Probe oder des Fangnetzes beitragen kann. Der Betrag der Restenergie soll im Folgenden nicht berücksichtigt werden, verlässt nach dieser Annahme die Probe also nicht. Auch diese Annahme führt wiederum dazu, dass die theoretisch maximal mögliche Energiezufuhr in die Probe überschätzt wird.

In Tabelle 6.1 sind die kinetischen Energien $E_{kin,0}$ für die verschiedenen untersuchten Probenkombinationen aufgetragen. Dabei sind 10 % für die plastische Deformation bereits abgezogen. Die Geschwindigkeit beträgt immer 131 m/s für jeweils beide Proben.

Tabelle 6.1 Kinetische Energien für verschiedene Probenkombinationen.

	Al (2 mm) + Al (2 mm)	Al (2 mm) + DC01 (1 mm)	Al (2 mm) + Cu (1 mm)	Cu (1 mm) + Cu (1 mm)
$E_{kin,0}$	12,0 J	14,7 J	15,9 J	19,8 J

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Energieeintrag, der aus den experimentell gewonnenen Temperaturen berechnet wird, den tatsächlichen Betrag aufgrund der gemäß Abschnitt 5.3 getroffenen Vereinfachungen eher unterschätzen wird. Für die analytische Berechnung der Temperaturerhöhung aus der kinetischen Energie und den oben beschriebenen Einflussfaktoren gilt, dass sie den Betrag der Temperaturerhöhung eher überschätzt. Diese Einordnung der berechneten und gemessenen Werte in Relation zu den tatsächlichen Werten illustriert Abbildung 6.1.

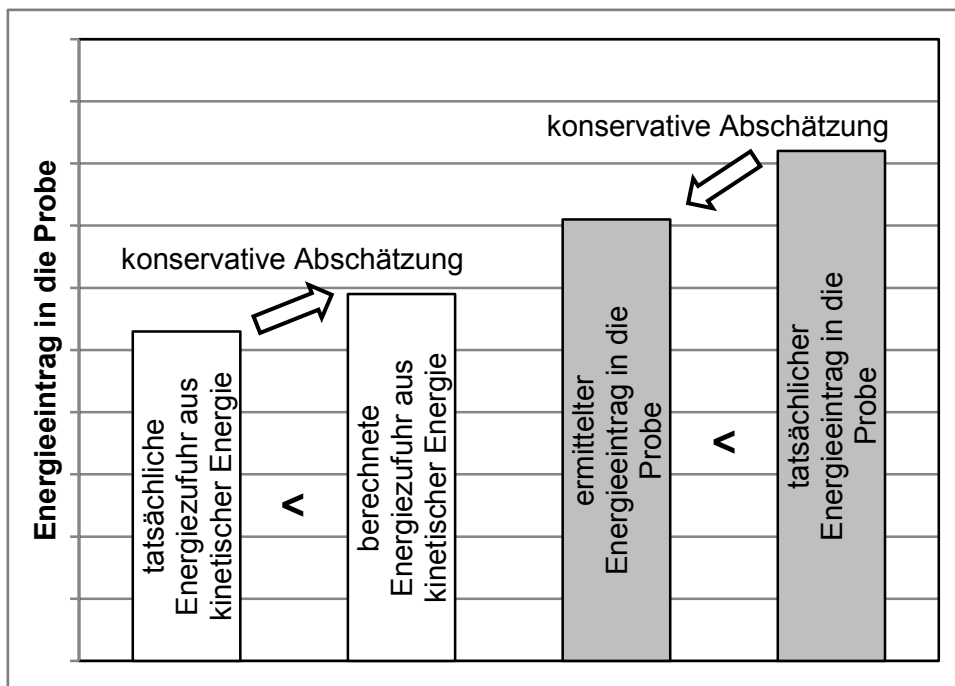


Abbildung 6.1 Schematische Darstellung der Abschätzungen und Messungen für den Energieeintrag in eine Probe.

6.2 Vergleich von berechneter Energiezufuhr und Energieeintrag

Abbildung 6.2 zeigt, ergänzend zu den analytisch berechneten Energiezufuhren aus Tabelle 6.1 in Abschnitt 6.1, die aus den Experimenten ermittelten Energieeinträge für verschiedene Werkstoffkombinationen. Die notwendigen Korrekturen, die in Abschnitt 5.3.3 bestimmt werden, sind dabei bereits berücksichtigt. Bei jeder Werkstoffkombination wird immer jeweils der niedrigste und der höchste Messwert gestrichen. Das Umgebungsmedium ist

immer Luft, wobei die Umgebungstemperatur zwischen 18 °C und 28 °C liegt. Alle Versuche wurden bei einer Drehzahl von 5000 1/min durchgeführt, was einer Kollisionsgeschwindigkeit von etwa 262 m/s entspricht. Der Kollisionswinkel ist immer im Bereich des jeweiligen Prozessfensters beziehungsweise nahe der Prozessgrenze, sodass sowohl gefügte als auch nicht gefügte Proben zugrunde liegen. Bei den Ergebnissen bleibt hier allerdings zunächst unberücksichtigt, ob die Probekörper eine Verbindung eingegangen sind oder nicht. Die Energiebilanz von gefügten und nicht gefügten Proben wird in Abschnitt 6.4 untersucht und diskutiert.

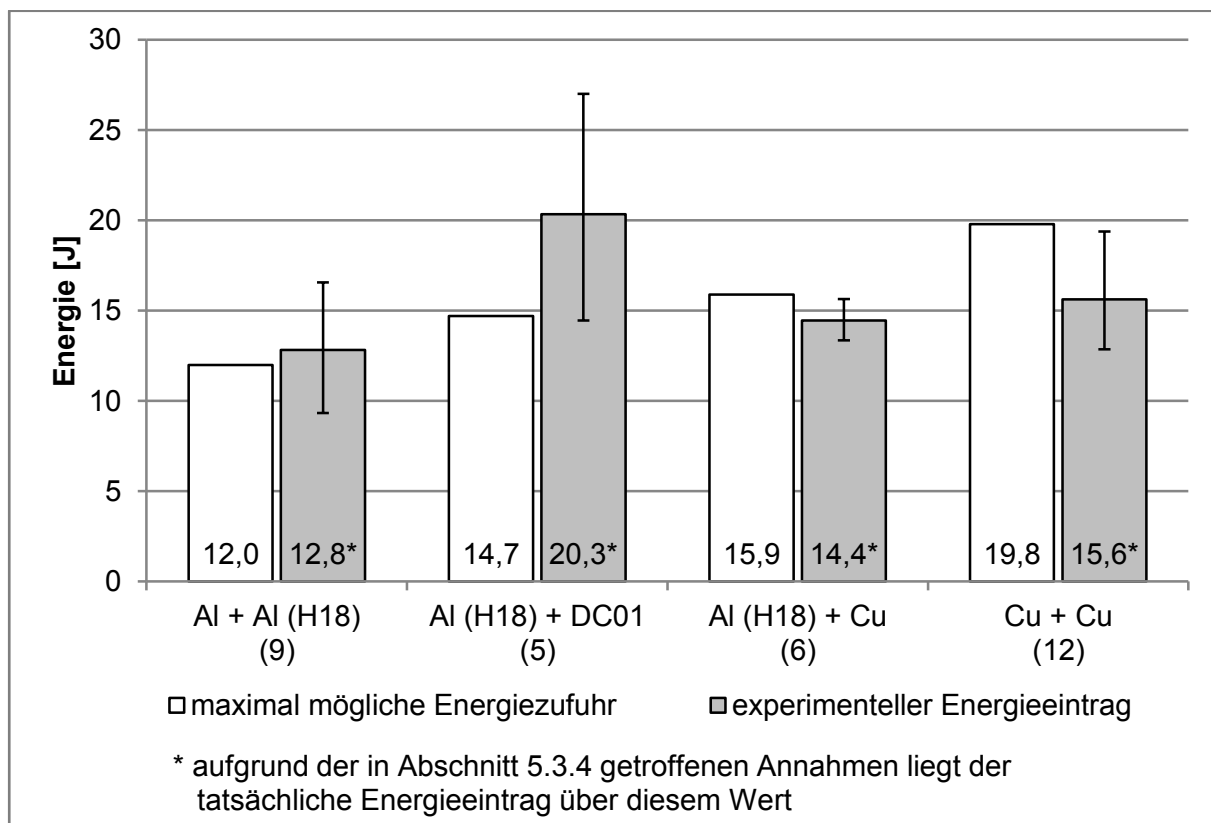


Abbildung 6.2 Theoretische Energiezufuhren und experimentell ermittelte Energieeinträge für verschiedene Werkstoffkombinationen. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.

Es fällt unmittelbar auf, dass die experimentell ermittelten Energieeinträge bei Verbindungen von Aluminium und Aluminium sowie Aluminium und Stahl über dem theoretisch ermittelten Wert liegen. Bei Verbindungen unter Beteiligung von Kupfer ist das Ergebnis entgegengesetzt, hier liegt der theoretische Wert über den Messergebnissen. Diese Befunde werden in Kapitel 7 interpretiert und ein Erklärungsansatz vorgestellt.

6.3 Betrag der Temperaturerhöhung in der Fügezone

Bei Untersuchungen am elektromagnetischen Pulsschweißen unter Vakuumbedingungen wird der Einfluss des Umgebungsmediums ausgeschlossen. Ausgehend von der beobachteten Lichtfarbe im Fügespalt treten Temperaturen über 1000 °C auf, was in Abschnitt 7.2 näher erläutert wird. Eine weitere experimentelle Methode, um die maximal herrschenden Temperaturen im sich schließenden Spalt abschätzen zu können, wurde in [Pab16a**] vorgestellt. Aus der Ozonkonzentration am sich schließenden Spalt während der Kollision lässt sich schließen, dass das ausgestoßene Material, also der Jet und das komprimierte Umgebungsmedium, mindestens mehrere hundert Grad heiß sein müssen. Weitere, zeitlich und örtlich hoch aufgelöste Verfahren zur Temperaturmessung während des Prozesses sind aufgrund ihrer Komplexität bislang noch nicht zum Einsatz gekommen. Dazu gehören beispielsweise die Kurzzeitthermographie, die thermographische Phosphorthermometrie oder die laserinduzierte Fluoreszenz [Her15].

Falls Temperaturen in der Größenordnung der Schmelztemperatur der beteiligten Werkstoffe auftreten, wird sich dies im Werkstoffgefüge an der Verbundzone manifestieren. EBSD Aufnahmen der Fügezone von mit dem elektromagnetischen Pulsschweißen gefügten Proben, veröffentlicht in [Sha16**], untermauern diese Befunde. Wie Abbildung 6.3 zeigt, besteht die Fügezone bei einem artgleichen Aluminiumverbund (EN AW-1050A im Zustand H18) aus ultrafeinkörnigem, stängelförmigem Gefüge, wobei die Körner quer zur Ausrichtung der Fügezone orientiert sind. Dabei handelt es sich um Erstarrungsgefüge, das sich aufgrund der rapiden Wärmeableitung in das dahinter liegende Grundmaterial derart ausgebildet hat. In diesem Fall hat der Bereich der Fügezone demnach Temperaturen über der Schmelztemperatur von Aluminium erreicht, also mindestens etwa 660 °C. Dabei ist bemerkenswert, dass dies schon am unteren Ende des Prozessfensters der Fall ist, an dem auch der Versuchsaufbau betrieben wird.

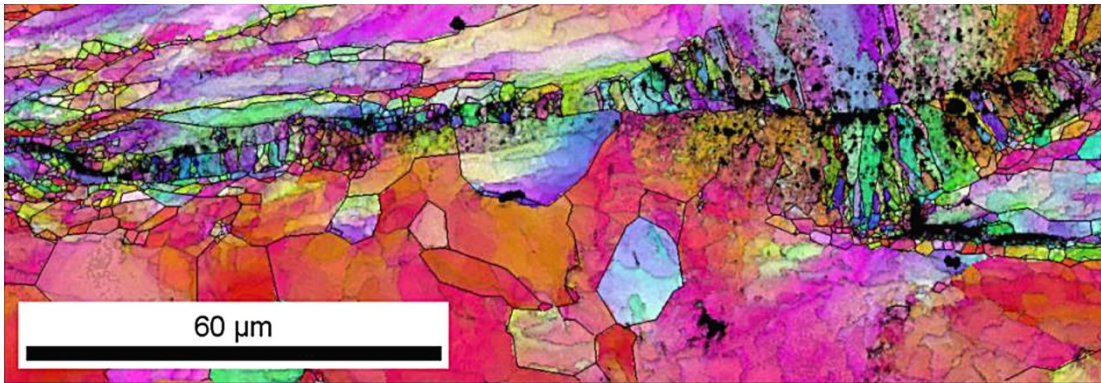


Abbildung 6.3 EBSD Aufnahme der Fügezone einer durch elektromagnetisches Pulsschweißen gefügten Verbindung aus Aluminium (EN AW-1050A H18) [Sha16**].

Weitere EBSD Aufnahmen von artgleichen Kupfer-Kupfer Verbindungen, die mit dem elektromagnetischen Pulsschweißen gefügt worden sind, zeigen diese Gefügestruktur nicht. Selbst in der deutlich höher aufgelösten Aufnahme in Abbildung 6.4 lässt sich kein Erstarrungsgefüge feststellen. Stattdessen besteht die Fügezone aus nahezu globularem, ultrafeinkörnigem Gefüge. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um dynamisch rekristallisiertes Gefüge, das aufgrund der hohen Dehnungen im Kollisionspunkt entstanden ist. Daneben ist der Materialfluss anhand der Struktur der deformierten Körner im Grundmaterial erkennbar: Der Kollisionspunkt ist in dieser Aufnahme von rechts nach links gelaufen. Aus diesem Befund lässt sich ableiten, dass die Schmelztemperatur von Kupfer, etwa 1080 °C, nicht erreicht wird. Eine höhere Kollisionsenergie kann auch bei Kupfer zu einem Aufschmelzen führen, auch wenn dies hier nicht aufgetreten ist.

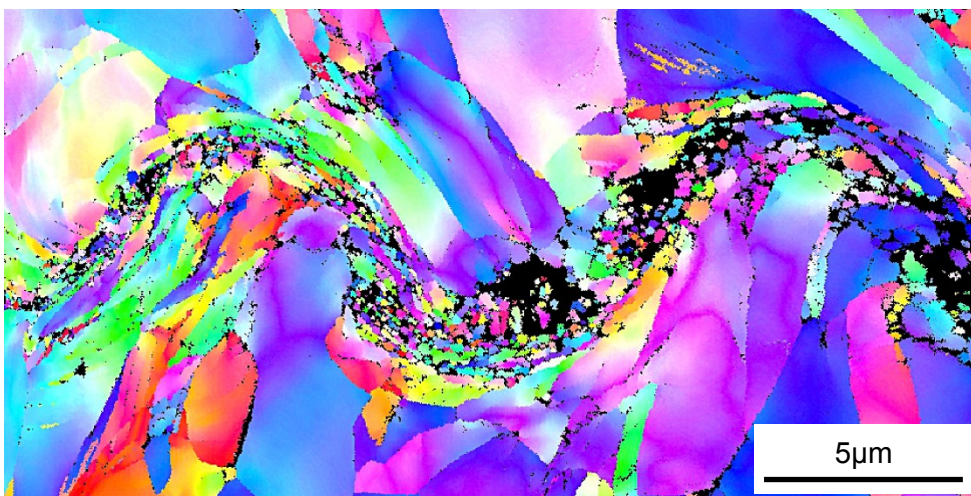


Abbildung 6.4 EBSD Aufnahme der Fügezone einer durch elektromagnetisches Pulsschweißen gefügten Verbindung aus Kupfer (2.0060).

Ähnliche Strukturen finden sich beispielsweise auch beim Reibrührschweißen. Hier treten ebenfalls unterhalb der Schmelztemperatur hohe plastische Dehnungen auf. In Abbildung 6.5 sind beispielhafte EBSD Aufnahmen gezeigt.

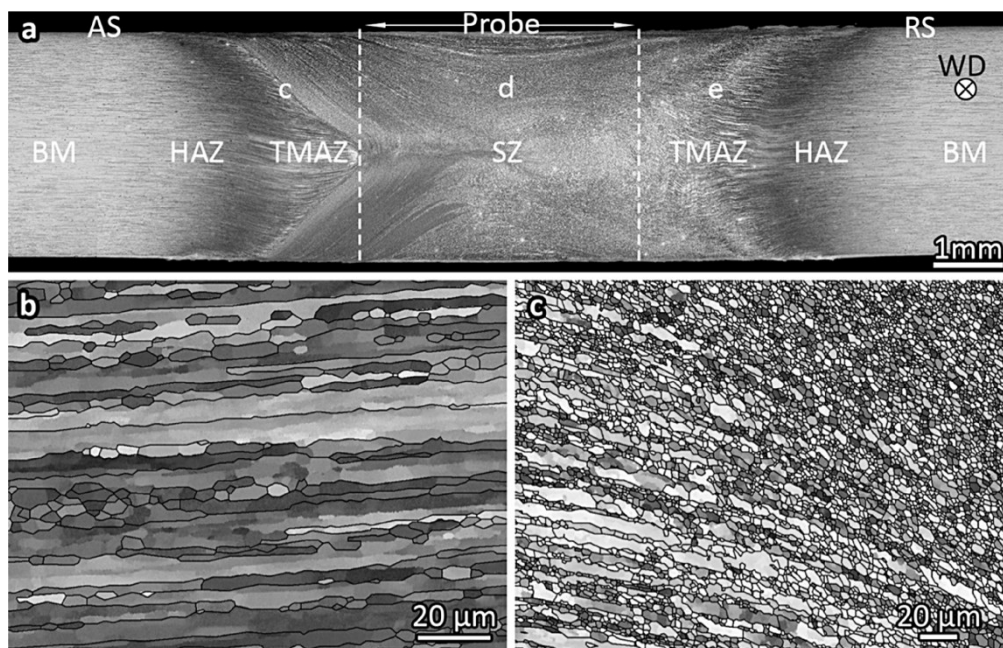


Abbildung 6.5 EBSD Aufnahmen einer reibrührgeschweißten Verbindung aus AA2198 [Wan15].

Die hier abgeschätzten Temperaturen in der Fügezone für Aluminium und Kupfer unmittelbar nach erfolgter Kollision lassen sich auf Plausibilität prüfen. Aus den Ergebnissen in Abbildung 6.2 ist der tatsächliche Energieeintrag in eine Probe bekannt. Aus den mikroskopischen Aufnahmen kann außerdem die Dicke der Fügezone abgeschätzt werden. Hier besteht allerdings eine Unbekannte, da die Dicke der Fügezone weder über ihre Länge konstant ist, noch über ihre Breite. Aus den mikroskopischen Aufnahmen wird ein Durchschnittswert für die Längsrichtung ermittelt, der ebenfalls als über der Breite homogen angenommen wird. Darüber hinaus erfahren die Proben durch den Aufprall eine geringe plastische Deformation, durch die sie näherungsweise im kompletten Volumen bereits leicht über Umgebungstemperatur erwärmt werden. Die Fügezone muss daher eine geringere Temperatur als hier berechnet aufweisen, damit die gesamte Probe die gemessene Temperatur erreicht.

Die Annahmen lauten wie folgt: Unmittelbar nach der Kollision liegt die heiße Fügezone mit einer Dicke von etwa 30 µm vor, während das dahinter liegende Grundmaterial noch die Umgebungstemperatur besitzt. Wenn die Temperatur

der gesamten Probe erfasst wird, ist ihre Temperaturverteilung in sehr guter Näherung homogen. Außerdem sind die thermischen Eigenschaften der Metalle unabhängig von der Temperatur und dem Aggregatzustand.

Für Aluminium beträgt die Erhöhung der Temperatur durchschnittlich 9,1 K, was dem Energieeintrag von 12,8 J entspricht. Die Fügezone muss daher etwa 1233 °C heiß sein, damit die gesamte Probe von 4 mm Dicke um diesen Betrag erwärmt wird. Diese Abschätzung berücksichtigt nicht die Schmelzenthalpie, die diesen Wert reduziert. Für Kupfer beträgt die Erhöhung der Temperatur durchschnittlich 15,7 K, was dem Energieeintrag von 15,6 J entspricht. Die Fügezone muss daher etwa 1067 °C heiß sein, damit die gesamte Probe von 2 mm Dicke um diesen Betrag erwärmt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass die abgeschätzten Temperaturen der Fügezonen unmittelbar nach der Kollision aus den Schliffbildern für Aluminium und Kupfer plausibel sind. Auch die Beobachtung, dass Aluminium den schmelzflüssigen Zustand erreicht, Kupfer jedoch nicht, lässt sich damit erklären.

6.4 Energiebilanz bei der Verbundausbildung

Ein großer Teil der im Prozess zugeführten Energie wird unmittelbar in der Fügezone umgesetzt. Deren Temperatur bestimmt die Temperatur der gesamten Probe. Es liegt daher nahe, die Energiebilanz der Probe hinsichtlich des Zustandekommens eines Verbundes zu untersuchen. Zu einem Verbund zählen dabei alle Proben, die nach dem Versuch gefügt sind, unabhängig von der Verbundfestigkeit. Beispielhaft werden dazu die artgleichen Verbindungen Aluminium-Aluminium im Zustand H18 und Kupfer-Kupfer untersucht. Artungleiche Verbindungen von Aluminium und Stahl ließen sich nicht fügen. Versuche mit Aluminium und Kupfer haben gezeigt, dass im Falle einer nicht erfolgten Verbindung die Temperaturen beider Proben ausgewertet werden müssen, da sie sich teilweise stark unterscheiden. Die Temperaturentwicklung durch den kurzen Kontakt und die unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften der Werkstoffe führen daher zu großen Ungenauigkeiten. In Abbildung 6.6 sind die aus den Experimenten berechneten, durchschnittlichen Energieeinträge für artgleiche Verbindungen von Aluminium und Kupfer unter Berücksichtigung der Verbindungsbildung aufgetragen.

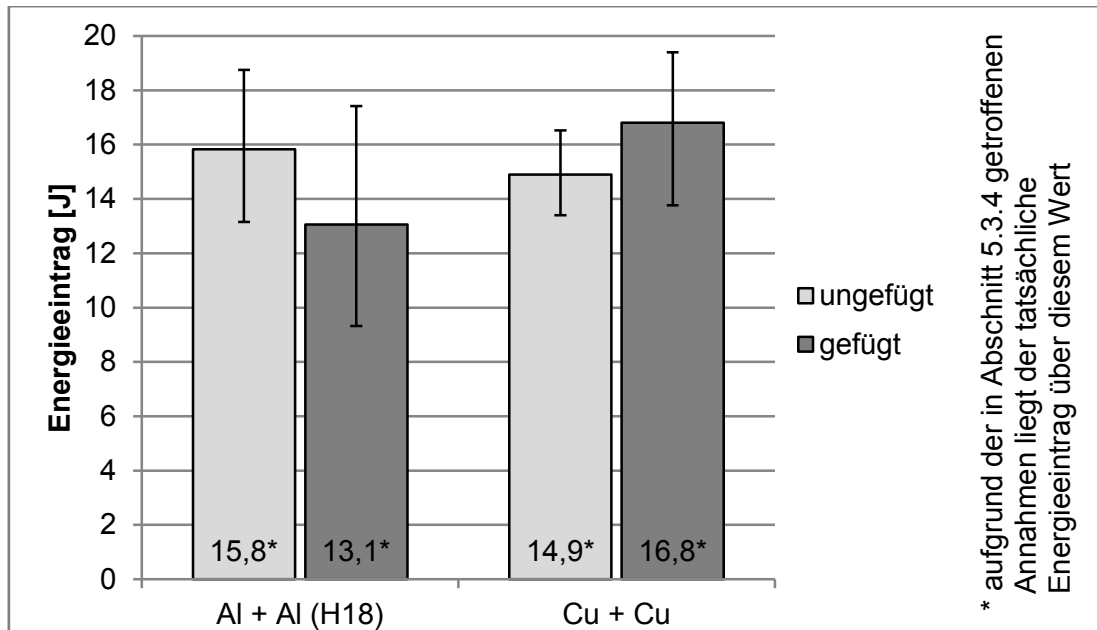


Abbildung 6.6 Energieeinträge für artgleiche Aluminium- und Kupferproben in Abhängigkeit der Verbindungsbildung.

Die Ergebnisse zeigen, dass es einen Einfluss der Verbindungsbildung auf die Energiebilanz gibt. Bei der Interpretation sind allerdings die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

1. Die nicht gefügten Proben besitzen unmittelbar nach der Kollision, wenn sie sich in der Flugphase zum Fangnetz befinden, eine größere Oberfläche pro Volumen als eine gefügte Probe. Der Temperaturgradient ist also eher höher als er bei der Berechnung angenommen wird. Der tatsächliche Energieeintrag liegt also sogar noch eher über der rückgerechneten, auch wenn diese Differenz sehr gering ausfallen wird, wie in Abschnitt 5.3.4 dargelegt wird.
2. Bei den Temperaturmessungen an nicht gefügten Proben ist aus Gründen der Vereinfachung fast immer nur eine Probe thermographisch erfasst worden. Obgleich die damit verbundene Streuung deutlich geringer ausfällt als bei artungleichen Fügepartnern, könnte sie trotzdem in einem hier signifikanten Bereich liegen.
3. Auch die nicht verbundenen Proben erfahren teilweise Nachkollisionen. Da sie nur die Hälfte der Masse einer gefügten Probe besitzen, führt ein gleiches Deformationsvolumen zu einer doppelt so großen Temperaturerhöhung. Damit verdoppelt sich auch die mit deren Abschätzung und Subtraktion verbundene Unsicherheit.

-
4. Der Verbund ist in vorliegenden Fall nicht quantifiziert worden. Wie in [Bec15*], [Gro17**] und [Pab16b**] gezeigt wird, können auch scheinbar erfolgreich gefügte Proben unter vergleichsweise geringer Belastung im Zugversuch versagen. Ursächlich ist ein nur mechanisches Verklammern oder ein nur sehr kleiner stoffschlüssig gefügter Bereich. Diese Proben befinden sich hier wahrscheinlich im Bereich überlappender Fehlerbalken.

Mit den Energiedifferenzen zwischen gefügten und nicht gefügten Proben lassen sich die flächenbezogenen „Bindeenergien“ für Aluminium und Kupfer berechnen. Die Fläche einer Probe beträgt mit anteiliger Sollbruchstelle $146 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Gemäß Abbildung 6.6 beträgt die Energiedifferenz 2,7 J für Aluminium und 1,9 J für Kupfer. Daraus ergibt sich, dass bei Aluminium eine spezifische Energie von etwa $18,5 \text{ kJ/m}^2$ zur Verbindungsbildung aufgebracht werden muss, wohingegen bei Kupfer eine Energie von etwa 13 kJ/m^2 frei wird. Ähnliche, jedoch nur analytische Energiebilanzen sind in der Literatur vorhanden. Die Ausbildung von Verbünden unterschiedlicher Metalle ist in [Oeb85] energetisch betrachtet worden, allerdings mit Abschätzungen zum Sprengschweißen. Die Energien liegen hier jedoch lediglich bei maximal 3 J/m^2 und damit etwa vier Größenordnungen darunter.

Das Vorzeichen bei Aluminium ist insofern interessant, als dass die endotherme Verbindungsbildung auf eine geringe Verbindungsqualität schließen lassen könnte. Zahlreiche Untersuchungen in der Vergangenheit zeigen jedoch, dass kollisionsgeschweißte, artgleiche Aluminiumverbindungen exzellente Gebrauchseigenschaften aufweisen, was in Abschnitt 2.7.2 und [Bec15*] gezeigt wird. Artgleiche Kupferverbindungen besitzen ebenfalls sehr gute mechanische und elektrische Eigenschaften. Gleiches gilt auch für artungleiche Verbünde aus Aluminium und Kupfer, die bereits in der Massenproduktion zu finden sind.

Da der Kollisionswinkel bei identischer Kollisionsgeschwindigkeit das Prozessfenster und somit das Zustandekommen der Verbindung bestimmt, ist zusätzlich eine Abhängigkeit der Temperatur vom eingestellten Kollisionswinkel zu erwarten. Zudem ist davon auszugehen, dass sich die Zustände im sich schließenden Spalt abhängig vom Winkel ändern, da hierdurch direkt die Geschwindigkeit des Kollisionspunktes und damit die Kompression des Umgebungsmediums beeinflusst wird.

Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 zeigen einen Einfluss des Winkels, der durch Ausgleichsgeraden hervorgehoben ist. Sowohl für Aluminium als auch für Kupfer gilt, dass der exotherme beziehungsweise endotherme Charakter im Bereich einer zustande kommenden Verbindung erkennbar ist. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Entwicklung der eingetragenen Energie bei zu kleinen und zu großen Winkeln außerhalb des Prozessfensters nicht.

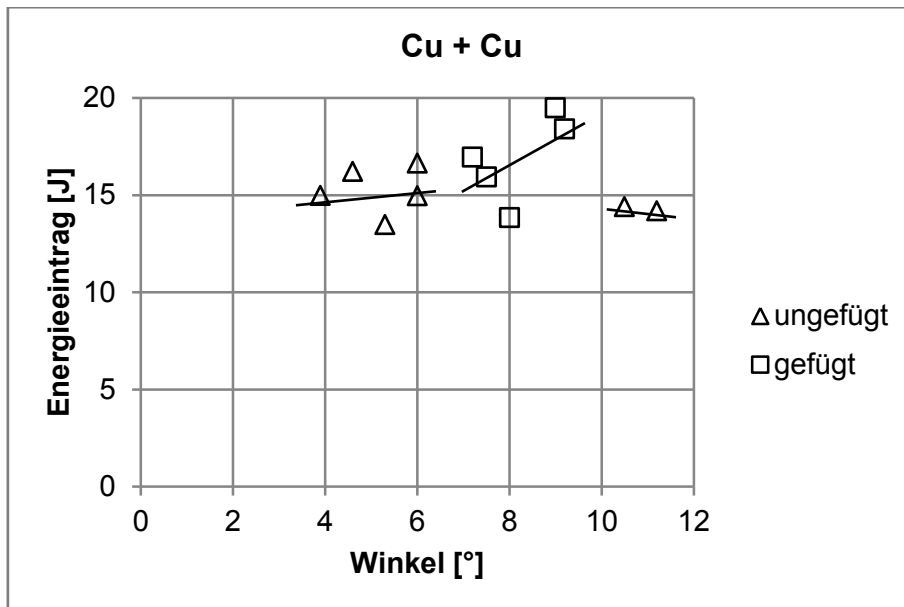


Abbildung 6.7 Energieeintrag in Abhängigkeit vom Kollisionswinkel für die artgleiche Kupferverbindung.

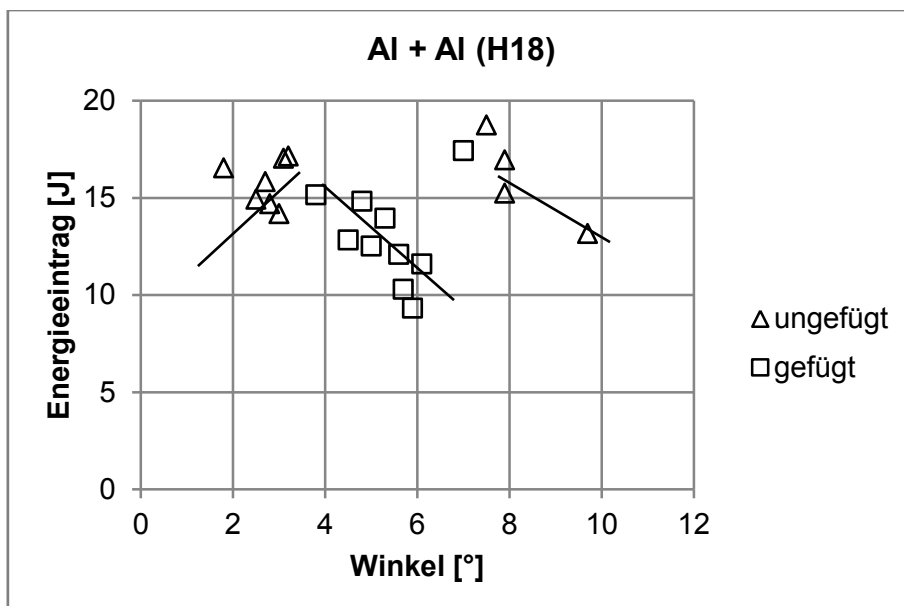


Abbildung 6.8 Energieeintrag in Abhängigkeit vom Kollisionswinkel für die artgleiche Aluminiumverbindung im Zustand H18.

Bemerkenswert ist auch, dass der Übergang von zu kleinen Winkeln zu einer Verbindung, also von links nach rechts im Diagramm, in beiden Fällen stetig ist. Der Übergang von einer Verbindung zu übergroßen Winkeln hingegen ist unstetig. Dabei könnte es sich um einen bislang unbekannten Mechanismus handeln, der im gesamten Bereich aktiv ist. Er wird überlagert durch die exotherme beziehungsweise endotherme Verbindungsbildung, die verstärkt an Einfluss gewinnt und bei größeren Winkeln mit Verlassen des Prozessfensters sofort nicht mehr aktiv ist. Aluminium und Kupfer zeigen dabei einen ähnlichen Verlauf. Als weitere mögliche Erklärung ist denkbar, dass es sich neben der Verbindungsbildung um zwei unbekannte Effekte handelt, die einen Einfluss auf den ermittelten Energieeintrag haben und vom Kollisionswinkel abhängig sind. Jeweils ein anderer ist bei zu großem oder zu kleinem Winkel signifikant, während der zweite zurücktritt. In Abschnitt 8.1 werden die Oberflächen nach der Kollision bei zu geringen und zu großen Winkeln mikroskopisch untersucht und diese Überlegungen wieder aufgegriffen.

6.5 Zusammenfassung

Aus der Geschwindigkeit der Probekörper vor der Kollision lässt sich die maximale, theoretisch mögliche Energiezufuhr der Proben durch den Prozess für verschiedene Werkstoffkombinationen berechnen. Weitere Effekte, wie beispielsweise die Luftreibung, sind bereits bei den Messungen berücksichtigt werden. Unmittelbar im Mikrometerbereich um die Fügezone werden Temperaturen im Bereich von 700 °C bis über 1000 °C erreicht. Bei Aluminium- und Stahlverbindungen wird ein Energieeintrag der Probekörper berechnet, der teilweise deutlich höher liegt, als es sich allein durch die kinetische Energie erklären lässt. Bei Verbindungen mit Beteiligung von Kupfer ergibt sich ein umgekehrtes Bild, hier fällt der Energieeintrag deutlich geringer aus als erwartet. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Ausbildung einer artgleichen Verbindung bei Aluminium endotherm ist, während sie bei Kupfer exotherm ist. Dies manifestiert sich in einem messbaren Temperatur- und damit Energieunterschied zwischen gefügten und nicht gefügten Proben. Der Kollisionswinkel alleine kann zur Vorhersage des Energieeintrags allerdings nicht herangezogen werden, obwohl er der einzige variierte Parameter ist.

7 Ursachen der Energieerhöhung

Die theoretisch maximal mögliche Energiezufuhr in die Proben lässt sich mit geringer Unsicherheit berechnen. Sie hat ihren Ursprung in der Umwandlung der kinetischen Energie in Wärmeenergie durch die Formänderung der Probe. Trotzdem bestehen teilweise erhebliche Abweichungen zu den experimentell gemessenen Temperaturerhöhungen. Die Ursache dafür ist also nicht makroskopisch in der Deformation der Probe zu suchen, sondern muss sich in der Füge- beziehungsweise Kollisionszone befinden. Die Energiebilanz in diesem Bereich und ihre Auswirkung auf die Verbindungseigenschaften sollen daher in diesem Kapitel untersucht werden. Es müssen bislang noch unbekannte Mechanismen wirksam sein, denn sonst lassen sich die Abweichungen zwischen theoretisch berechneten und den experimentell gefundenen Werten nicht erklären.

7.1 Energieeintrag durch exotherme Oxidation von Aluminium

Wie Abbildung 6.2 in Abschnitt 6.2 zeigt, besteht zwischen der theoretischen Energiezufuhr und dem experimentell ermittelten Energieeintrag eine teilweise erhebliche Diskrepanz, die sich auch mit den Streuungen nicht erklären lässt. Die dem Prozess zugeführte, kinetische Energie kann im Modellversuch sehr genau erfasst werden, sodass hier keine ausreichend große Unbekannte besteht. Ebenso können alle Energietransporte in die Proben hinein und aus den Proben heraus zumindest konservativ abgeschätzt werden, wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben wird. Daher liegen die gemessenen Werte eher unter den theoretischen Werten. Infolge dessen kommt als unbekannte Energiequelle für die Verbünde Aluminium-Aluminium und Aluminium-Stahl nur die Umsetzung chemischer Energie in Wärmeenergie in Form einer exothermen Oxidation von Aluminium infrage. Kameraaufnahmen vom Jet während der Kollision wie beispielsweise in Abbildung 7.1 legen nahe, dass er zumindest teilweise aus Staub besteht. Je nach Partikelgröße kann sich

Aluminiumpulver bereits bei Temperaturen unter 600 °C entzünden [Jac64] [Tru05]. Wie in Abschnitt 6.3 gezeigt wird, sind die im Bereich des Fügespalts auftretenden Temperaturen ausreichend hoch.

Reflexion des Jets auf der Oberfläche des Targets

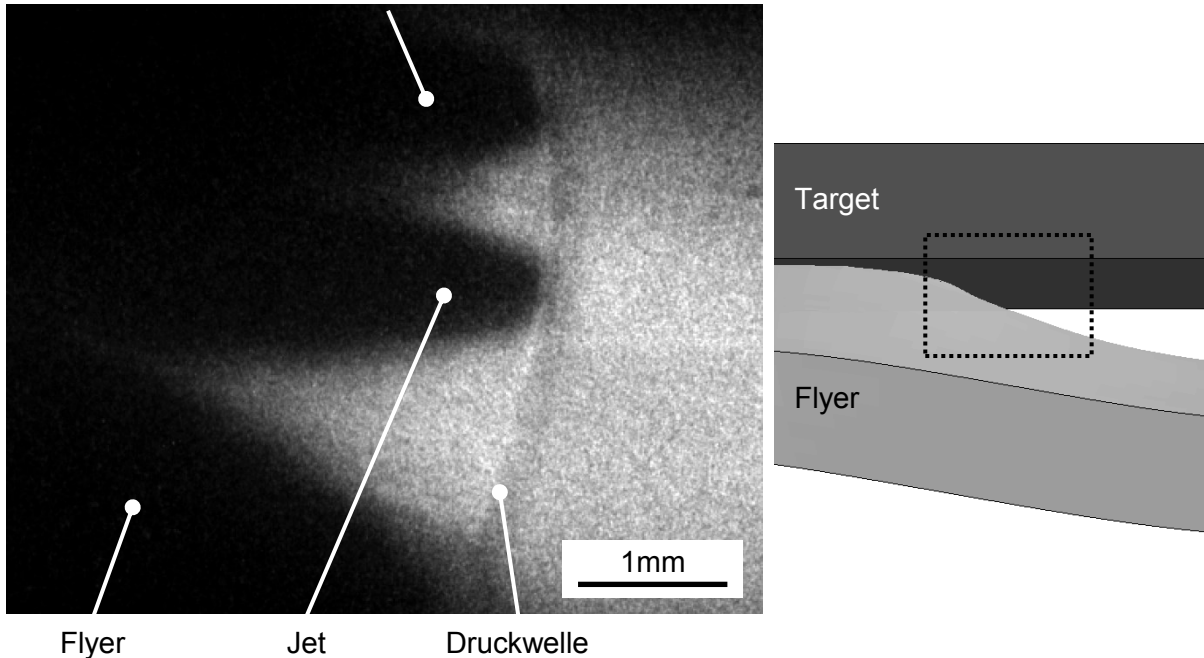


Abbildung 7.1 Jet in der Kameraaufnahme beim elektromagnetischen Pulsschweißen nach [Pab18**].

Um diese Möglichkeit zu prüfen, werden im Modellaufbau Versuche mit Aluminiumproben unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Da Stickstoff durch seinen Anteil an der Umgebungsluft von rund 80 % deren thermodynamische und mechanische Eigenschaften dominiert, ist die Reaktivität stark vereinfacht der einzige Parameter, der dadurch signifikant verändert wird. In den Versuchen sollte die gemessene Temperatur und damit die den Proben während des Prozesses zugeführte Energie daher geringer ausfallen, da kein Aluminium verbrennen kann.

Die Auswertung der Messungen bestätigt die Theorie. Wie Abbildung 7.2 zeigt, liegt der Energieeintrag unter Stickstoffatmosphäre mit 11,1 J sogar unter dem theoretisch ermittelten Wert von 11,9 J. Dieser Befund deckt sich mit der Tatsache, dass der experimentell ermittelte Energieeintrag den wahren Energieeintrag eher unterschätzt, wohingegen ihn die analytische Berechnung eher überschätzt, was in Abschnitt 6.1 erläutert wird. Mit berücksichtigt ist

bereits die leichte Abkühlung der Proben vor dem Beginn des Versuchs durch den expandierten Stickstoff in der Einhausung.

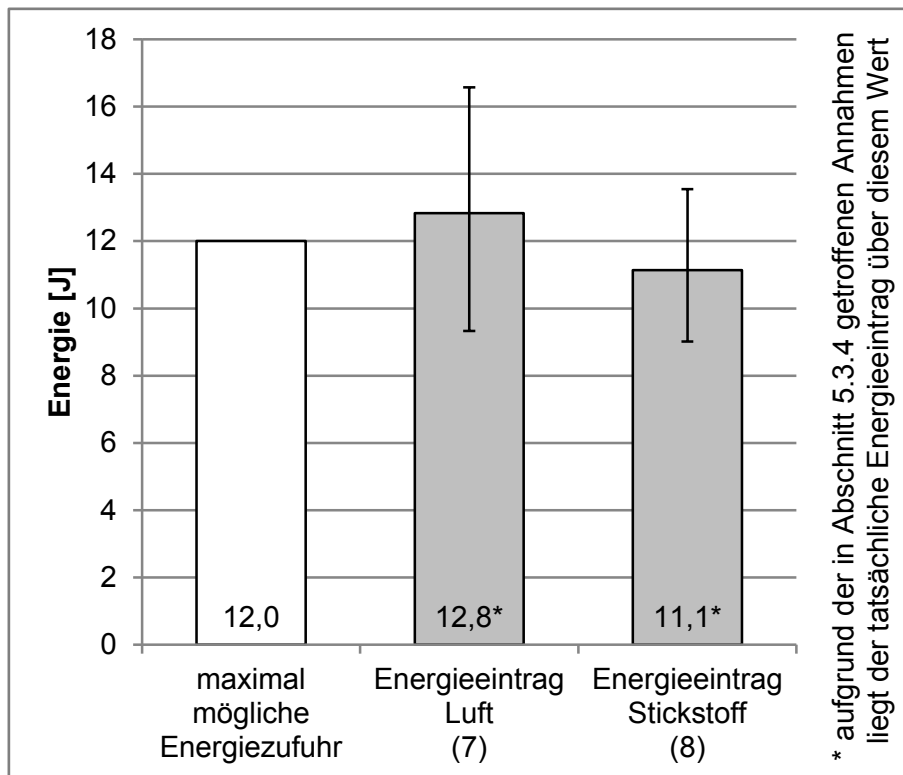


Abbildung 7.2 Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 unter Umgebungsluft und in Stickstoffatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.

In den Versuchen besteht theoretisch die Möglichkeit, dass bei den hohen herrschenden Temperaturen Aluminiumnitrid gebildet wird. Da diese Reaktion endotherm ist, führt sie allerdings nicht zu einer Erhöhung der Temperatur. Vergleichsversuche mit Argon, bei dem eine Reaktion gänzlich ausgeschlossen werden kann, bestätigen dies. Hier wird im Schnitt ein ähnlicher Energieeintrag von 11,4 J ermittelt, wie Abbildung 7.3 zeigt. Der Unterschied von 0,3 J liegt im Bereich der Streubreite. Denkbar ist allerdings auch, dass hier die erwähnte endotherme Bildung von Aluminiumnitrid ursächlich ist. Eine weitere Erklärung liefert die Verbundausbildung. Wie in Abschnitt 6.4 gezeigt wird, ist diese endotherm. Damit sind gefügte Proben kühler als nicht gefügte, erfahren also einen geringeren Energieeintrag. Bei den hier zugrunde liegenden Versuchen sind alle Proben in Stickstoffatmosphäre gefügt, die in Argonatmosphäre durchgängig nicht. Ursächlich ist die höhere Dichte des Argons, wodurch das Prozessfenster hin zu höheren Geschwindigkeiten verschoben wird [Pab16b**].

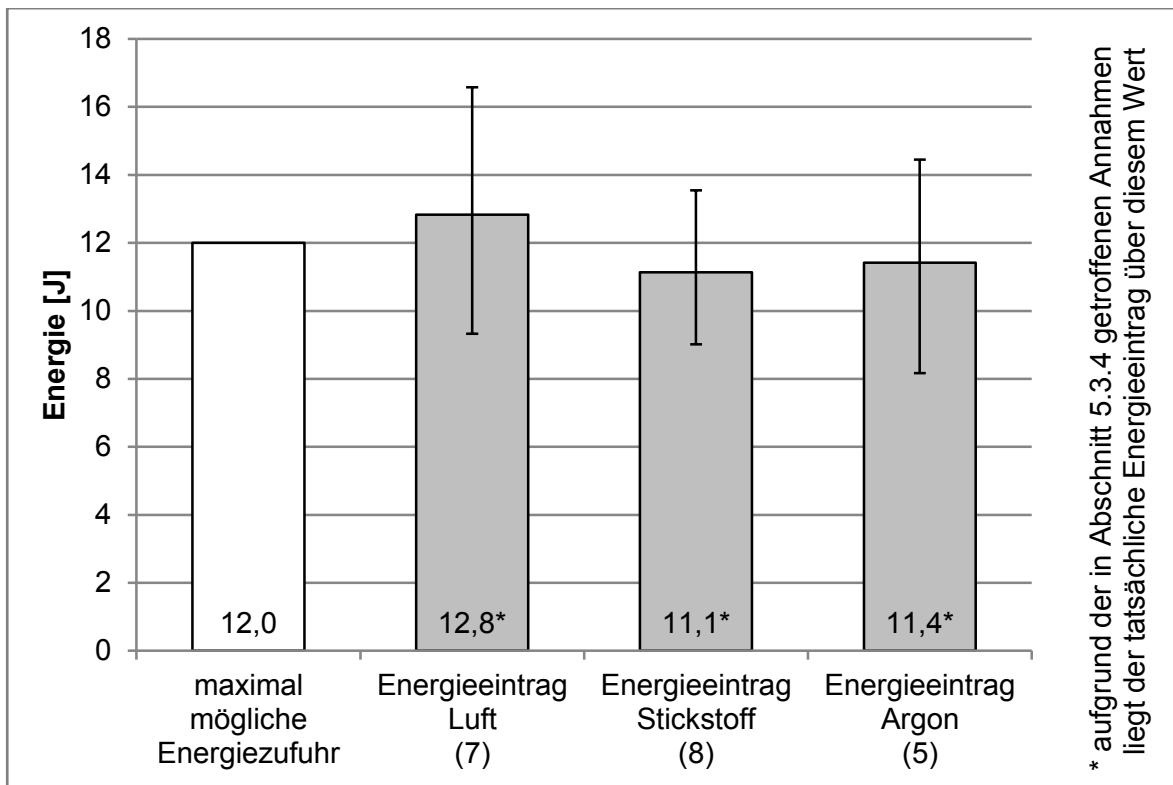


Abbildung 7.3 Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 unter Umgebungsluft, in Stickstoff- und in Argonatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.

Kupfer ist im Vergleich mit Aluminium reaktionsträger und besitzt eine Entzündungstemperatur von über 1300 °C [Bol98]. Daher wird bei Beteiligung von Kupfer ein geringerer Energieeintrag aus den Messwerten rückgerechnet als in der analytischen Abschätzung, was aufgrund der konservativen Annahmen zu erwarten ist. Bei der artungleichen Verbindung von Kupfer mit Aluminium beträgt die Abweichung noch etwa 1,6 J, während sie bei der artgleichen Kupferverbindung etwa 4,2 J beträgt, wie Abbildung 6.2 in Abschnitt 6.2 darstellt. Die Ursache für diesen Unterschied kann in der Beteiligung von Aluminium liegen, das aufgrund der exothermen Reaktion mit dem Sauerstoff die Abweichung reduziert. Noch nicht schlüssig erklärbar ist hingegen die starke Abweichung bei der artgleichen Kupferverbindung. Hier könnte ein größerer Anteil der kinetischen Energie in Formänderungsenergie gespeichert und nicht in Form von Wärme dissipiert werden.

Ein weiterer Erklärungsansatz für die Abweichung bei Kupfer ist eine möglicherweise größere Ausprägung des Jets. Dessen Masse kann mit den verfügbaren Messmethoden nicht quantitativ bestimmt werden. Um diese Vermutung zu prüfen, werden Referenzversuche mit Reinaluminium im

halbharten Zustand H14 durchgeführt. Seine chemische Zusammensetzung entspricht der des Zustands H18. Hier liegt der ermittelte Energieeintrag in einer ähnlichen Größenordnung wie die analytischen Berechnungen und die Versuche in Stickstoff- und Argonatmosphäre für den Zustand H18, wie Abbildung 7.4 zeigt. Aufgrund der geringeren Zugfestigkeit von etwa 118 N/mm² zu etwa 170 N/mm² (Tabelle 4.1 in Abschnitt 4.3) wird bei unveränderten Kollisionsparametern mehr Grundmaterial plastifiziert und ausgestoßen. Der Jet ist daher stärker ausgeprägt [Pab16b**]. Eine Verbrennung kann erst weiter außerhalb des sich schließenden Spalts stattfinden, wenn sich die Oberfläche des Jets vergrößert. Metallographische Schliffbilder in Abschnitt 8.1 stützen diese Theorie.

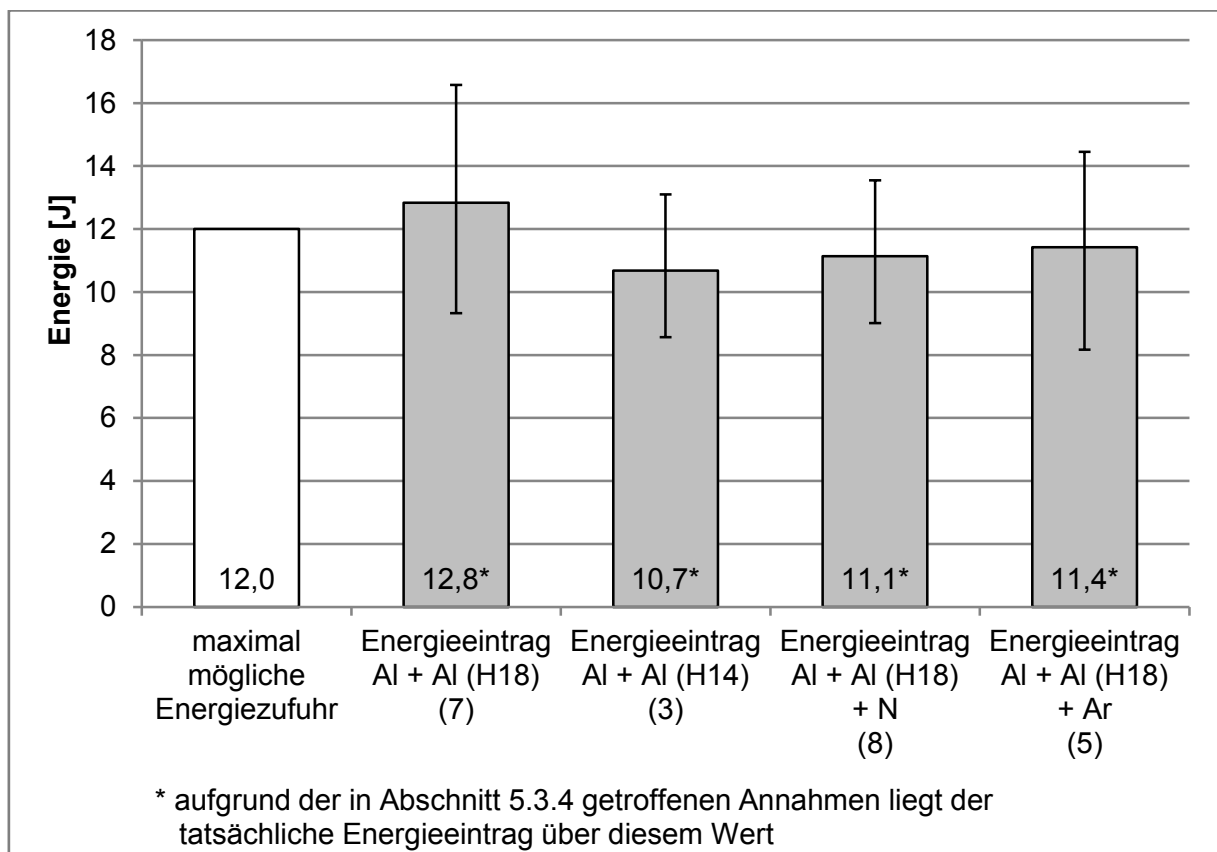


Abbildung 7.4 Energieeintrag für hartes (H18) und halbhartes (H14) Aluminium EN AW-1050A. Zum Vergleich: Zustand H18 in Stickstoff- und Argonatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.

Versuche mit Aluminium im Zustand H18, aber dünn beöhlten Proben auf der Kollisionsseite weisen einen Energieeintrag auf, der deutlich unterhalb des analytischen Betrags liegt. Abbildung 7.5 zeigt den rückgerechneten Energieeintrag für Proben, die ganz oder nur zur Hälfte beölt worden sind

(Teilung auf der Probenoberfläche in Längsrichtung). Wahrscheinlich ist dieser Befund darauf zurückzuführen, dass das Öl an der Oberfläche verdampft wird, während es ausgestoßen wird. Der damit verbundene Wärmeentzug sorgt für diesen geringeren, gemessenen Energieeintrag. Zwischen den beölten Flächen stellt sich keine Verbindung ein.

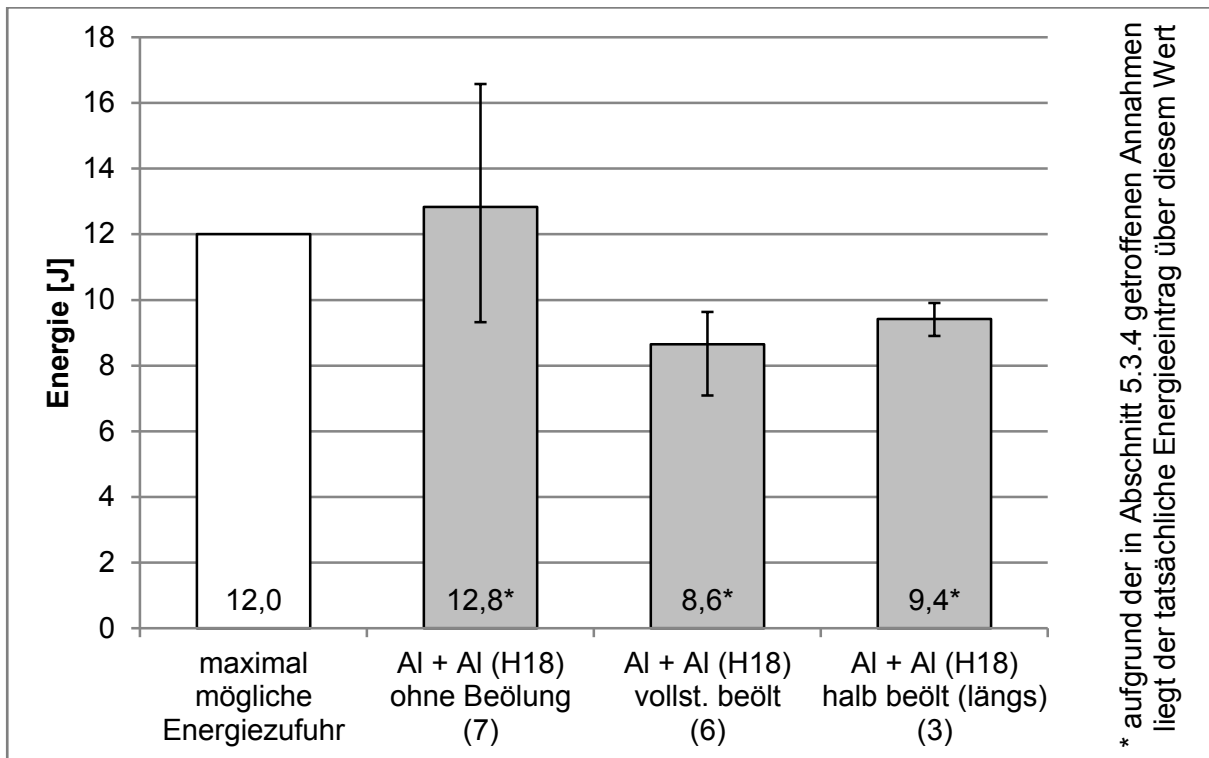


Abbildung 7.5 Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 und zusätzlich aufgebrachtener Beölung. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.

Auffällig ist bei den Versuchen mit Aluminium im Zustand H18 und Kupfer, Aluminium und Aluminium im Zustand H14 sowie Aluminium und Aluminium im Zustand H18 mit beölter Oberfläche, dass die quasistatischen Aufnahmen ein deutlich helleres Prozessleuchten zeigen als dies bei Aluminium im Zustand H18 und nicht beölter Oberfläche der Fall ist. Gleichzeitig liegt bei den ersten drei Kombinationen der experimentell errechnete Energieeintrag unter dem theoretischen Wert, wohingegen artgleiche Verbindungen aus Aluminium im Zustand H18 immer darüber liegen. Jeweils eine exemplarische Aufnahme bei einem Kollisionswinkel von etwa 6° ist in Abbildung 7.6 gezeigt. Dieser Befund stützt die Theorie der externen Verbrennung sowie des Wärmeentzugs durch ein Verdampfen des Öls, da ein geringerer Energieeintrag in die Probe mit einem stärker ausgeprägten Leuchten einhergeht.

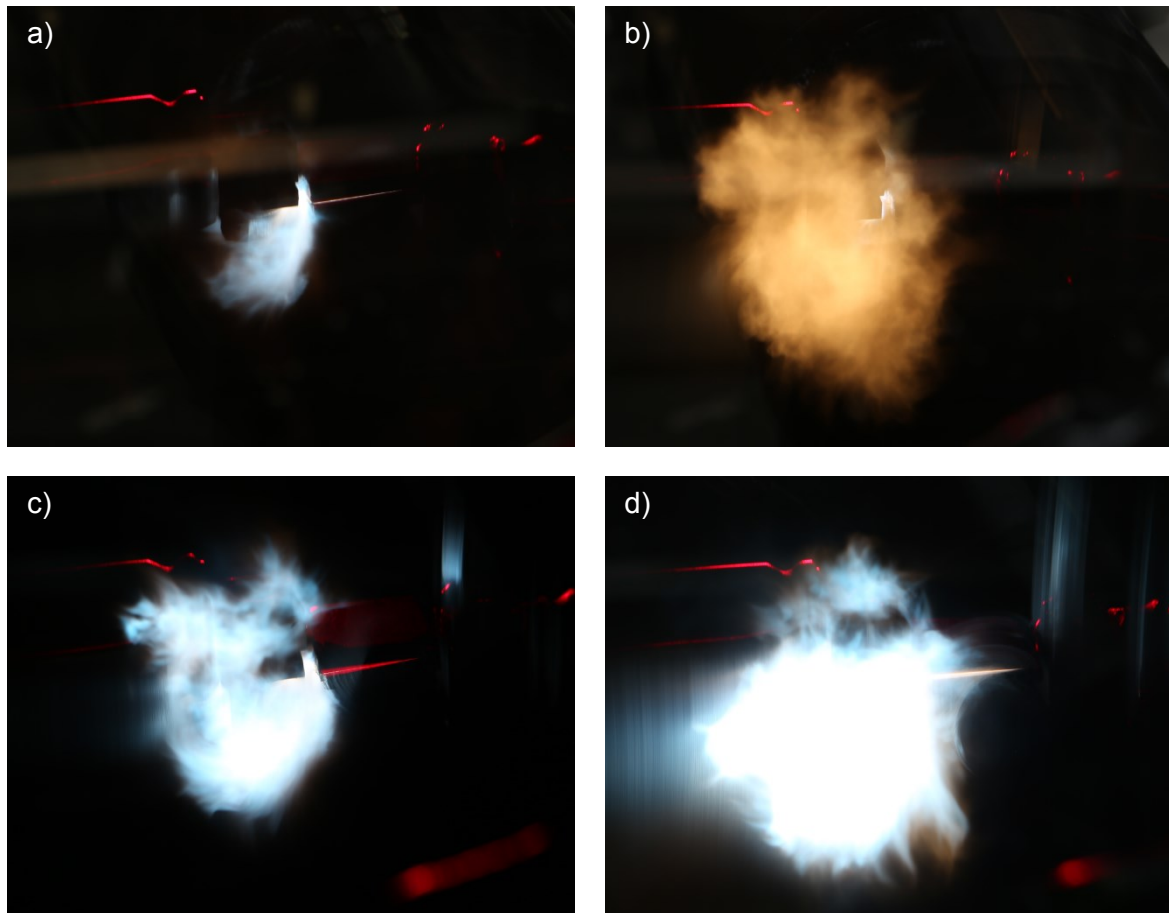


Abbildung 7.6 Langzeitbelichtungen von verschiedenen Kollisionen: Aluminium-Aluminium (H18) ohne (a) und mit zusätzlicher Beölung (b), im Zustand H14 (c) und Aluminium (H18)-Kupfer (d).

Bei der dünnen Schmiermittelschicht ist zu beachten, dass hier zusätzlich die Kollision beeinflusst wird. Durch die reibwertverringende Schicht kann die Jetbildung aufgrund der geringeren Tangentialspannungen nicht initiiert werden, was sich durch glatte, nicht gefügte Oberflächen zeigt. In Abbildung 7.7 ist die Oberfläche einer solchen Probe gezeigt, zusammen mit einer unbeöhlten Probe vom unteren Rand des Prozessfensters bei einem Winkel von $4,3^\circ$. Bei letzterer ist die Oberfläche trotz des in diesem Fall kleineren Kollisionswinkels deutlich rauer und dunkler, da sich hier der Jet zwar in Anfängen gebildet hat, jedoch den Spalt nicht verlassen konnte.

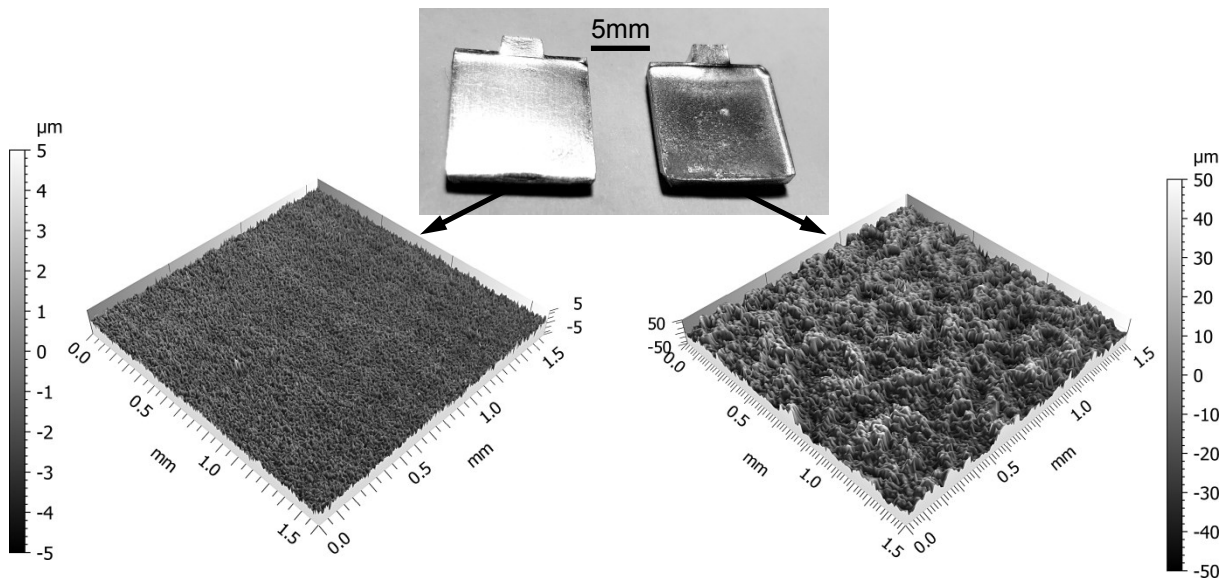


Abbildung 7.7 Vergleich der Oberflächen nicht gefügter Proben mit (links) und ohne Beölung (rechts).

Künstliche Schichten können den Prozess behindern, beispielsweise durch Eloxieren bei Aluminium, aber in anderen Fällen auch begünstigen, wie beispielsweise durch Vernickeln [Bel16]. Die negativen und auch positiven Auswirkungen aufgebrachter Beschichtungen auf die Mechanismen sind bislang kaum verstanden. Auf eine tiefergehende Diskussion wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

In der Fügezone befindet sich bei einer erfolgreichen Verbindung kein Aluminiumoxid, was in Abschnitt 2.7.3 belegt wird. Falls also eine Verbrennung stattfindet, müssen sich die Produkte außerhalb der Fügezone befinden. Dadurch muss auch ein Massendefekt auftreten. Die molare Bildungsenthalpie für Al_2O_3 beträgt 1676 kJ/mol [Kur15, S.127]. Mit der molaren Masse von Aluminium von etwa 27 g/mol und der Tatsache, dass zwei Aluminiumatome in der Verbindung vorliegen, beträgt der spezifische Massendefekt etwa 0,032 g/kJ. Die Differenz von theoretischer Energiezufuhr und experimentell ermitteltem Energieeintrag beträgt für Aluminium etwa 1 J, wie Abbildung 6.2 in Abschnitt 6.2 zeigt. Für diese Energie müssen nur etwa 0,03 mg Aluminium umgesetzt werden. Selbst wenn nur ein Bruchteil der Verbrennungswärme in die Proben übertragen wird, also real deutlich mehr als diese berechnete Masse oxidiert wird, so ist dieser Massendefekt noch immer vernachlässigbar und lässt sich daher auch nicht praktisch mit der verfügbaren Wägetechnik (± 1 mg) messen.

7.2 Energieeintrag durch plastische Deformation

Bei der plastischen Deformation ist zwischen dem mikroskopischen und dem makroskopischen Maßstab zu unterscheiden. Die makroskopische Deformation besteht vor allem aus einer geringfügigen Deformation der Proben im Analogieversuch. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen wird der Flyer zusätzlich während der Beschleunigung über den Luftspalt bis zur Kollision deformiert. Beide Prozesse sind hinreichend genau modellierbar. Die mikroskopische Umformung und der Materialtransport in der Fügezone bis zum Mikrometerbereich sind hingegen wenig bekannt. Durch die hohen Dehnraten stoßen die analytischen und numerischen Modelle schnell an Grenzen. Zudem spielen noch nicht vollständig verstandene Wechselwirkungen mit dem Umgebungsmedium eine große Rolle, vor allem der Strömungswiderstand, der den Jet beeinflusst [Pab16b**] [Pab18**].

Der Energieeintrag in die Fügezone nur aufgrund der mikroskopischen und makroskopischen plastischen Deformation ohne andere Effekte lässt sich nur im Vakuum näherungsweise experimentell untersuchen. Der Modellversuch bietet diese Möglichkeit aufgrund der mangelnden Dichtigkeit der Einhausung nicht. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen sind Versuche unter Vakuum zwar problemlos möglich, nicht jedoch eine aussagekräftige Temperaturmessung der Probe. Es findet zum einen ein signifikanter Wärmeeintrag durch die Wirbelströme statt. Zum anderen ist die Fügezone verglichen mit der Größe der Fügepartner klein, sodass deren Erwärmung nur sehr gering ausfällt. Außerdem sind die Fügepartner eingespannt, wodurch eine rasche zusätzliche Wärmeabfuhr stattfindet.

In Versuchen mit dem elektromagnetischen Pulsschweißen lässt sich allerdings indirekt auf den Betrag der Temperatur in der Fügezone schließen. Aufnahmen von Versuchen mit Aluminium bei Unterdruck (< 50 mbar) zeigen auch hier ein Prozesslicht, beispielhaft dargestellt in Abbildung 7.8. Hier kann jedoch weder ein komprimiertes Gas im Plasmazustand noch eine Verbrennung vorliegen.

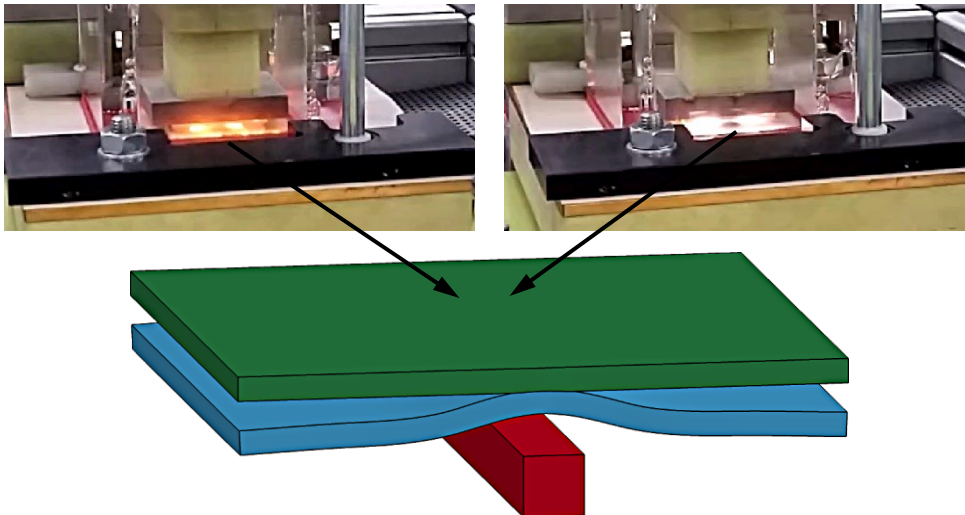


Abbildung 7.8 Langzeitbeleuchtung beim elektromagnetischen Pulsschweißen der artgleichen Kombination von Aluminium (EN AW-1050A H18) bei Umgebungsdruck (links) und Unterdruck (rechts).

Ursächlich kann daher nur der durch die plastische Deformation erhitzte Jet sein. Aus der spektralen Verteilung dieses Leuchtens lässt sich theoretisch mithilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes der genaue Temperaturbereich identifizieren, was jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit sein soll. Aufgrund der orange-gelben Färbung beträgt die mittlere Wellenlänge λ etwa 580 nm. Mithilfe des Planckschen Strahlungsspektrums (Abbildung 7.9) lässt der Temperaturbereich grob zwischen 1000 K und 2000 K abschätzen, also etwa 700 °C bis 1700 °C.

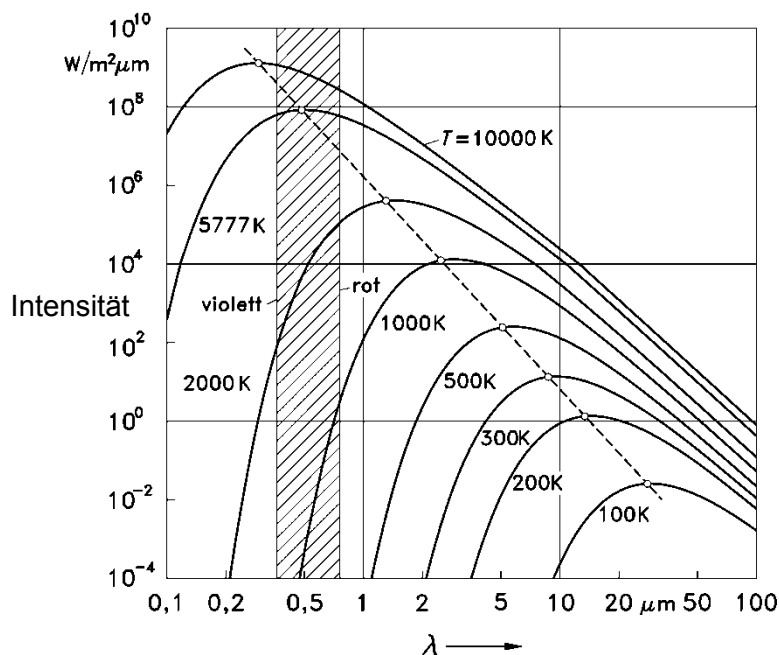


Abbildung 7.9 Plancksches Strahlungsspektrum nach [Bae13, S. 650].

Dieser Betrag steht im Einklang mit den Abschätzungen aus Abschnitt 6.3. Unter Atmosphärenbedingungen ist der Blauanteil deutlich ausgeprägter, was zumindest im sichtbaren Bereich außerhalb des Spaltes auf eine höhere Temperatur hindeutet. Diese kann beispielsweise durch brennendes Aluminium hervorgerufen werden. Die Flamme sowie im Plasmazustand vorliegendes Umgebungsgas verfälschen hier allerdings die Temperaturmessung des Jets anhand der Farbtemperatur.

Der Beitrag der Wellenbildung zum Energieeintrag in die Probe ist vergleichsweise gering. Abbildung 7.10 zeigt beispielhaft die mikroskopische Fügezone einer Probe vom Modellversuch.

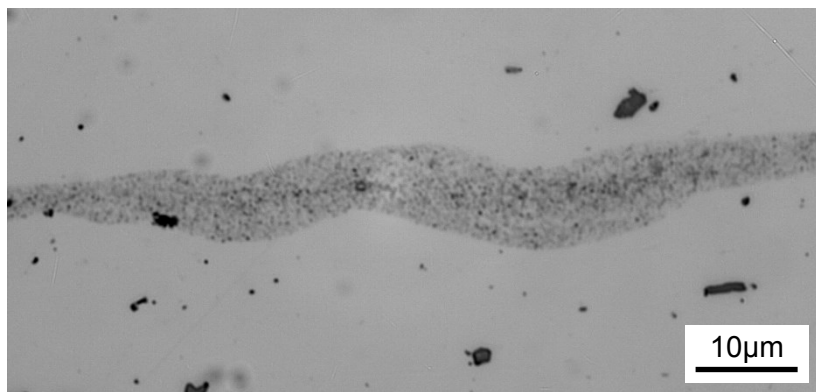


Abbildung 7.10 Ausschnitt der Fügezone aus einer Modellversuchsprobe.

Die Wellen in der Fügezone besitzen in diesem Bereich eine Amplitude von etwa $7\text{ }\mu\text{m}$. In einer vereinfachten Annahme wird ein Bereich von $20\text{ }\mu\text{m}$ Dicke bei der Kollision plastisch deformiert. Mit der Probenoberfläche von $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ergibt sich daraus ein deformiertes Volumen von etwa $2,9\text{ mm}^3$. Mit der Abschätzung aus der Temperatúrauswertung in Abschnitt 5.3.3, wonach ein Deformationsvolumen von 1 mm^3 Aluminium im Zustand H18 zu einem Energieeintrag in eine gefügte Probe von $0,389\text{ J}$ führt, bedeutet dies rechnerisch einen Energieeintrag von etwa $1,1\text{ J}$. Die Ausbildung der Wellen, also Amplitude und Wellenlänge, variiert je nach Werkstoffkombination und Kollisionsparametern sehr stark, was in Abschnitt 2.7.1 gezeigt wird. Sie kann zudem als Bestandteil der makroskopischen plastischen Deformation gesehen werden und ist damit bereits bei der Umwandlung der kinetischen Energie in Wärmeenergie beziehungsweise Formänderungsenergie berücksichtigt.

7.3 Energieeintrag durch Kompression des Umgebungsmediums

Hinsichtlich der Energiebilanz der Probe stellt die Kompression des gasförmigen Umgebungsmediums einen Energieverlust dar, der in Abschnitt 5.3.4 beschrieben wird. Bevor es stark komprimiert und erhitzt den sich schließenden Spalt während der Kollision verlässt, kann es jedoch Energie an die Oberfläche der Fügepartner abgeben. Die Aufnahmen vom Analogieversuch in Abbildung 7.11 verdeutlichen den Effekt der Überschallkompression. Aufgrund der geringen Größe der Fügepartner sind der Jet und die mutmaßliche Verdichtungswelle relativ gering ausgeprägt. Beide bewegen sich hier mit etwa 2100 m/s.

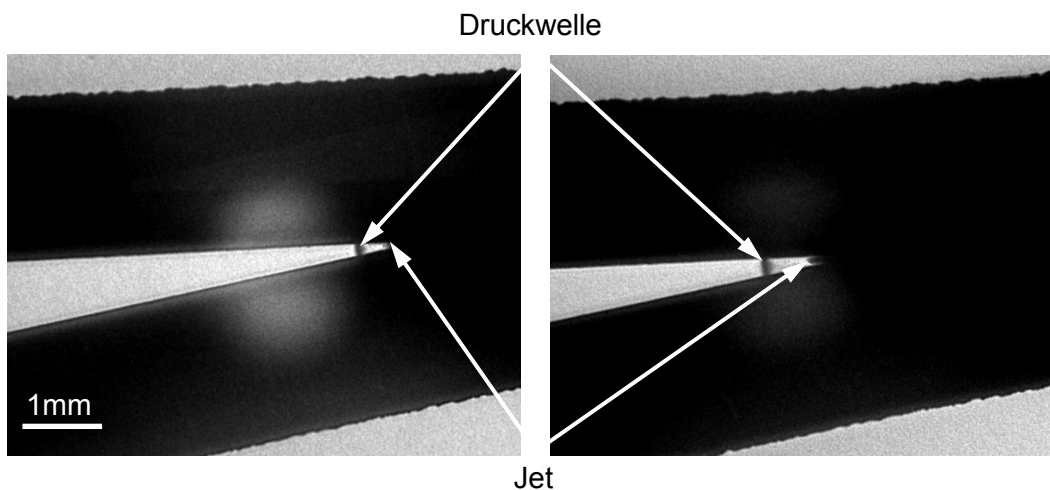


Abbildung 7.11 Aufnahmen vom Versuchsstand: 1,24 μ s (links) und 2,08 μ s (rechts) nach dem ersten Kontakt.

Abbildung 7.12 zeigt beim elektromagnetischen Pulsschweißen den sich schließenden Spalt 14,4 μ s nach Beginn der Entladung beim ersten Kontakt und etwa 2,4 μ s später. An der Spitze des besser sichtbaren Jets, der hier als Zunge in Erscheinung tritt, ist deutlich die Verdichtungswelle zu erkennen. Die Versuche sind in Umgebungsatmosphäre durchgeführt worden. Auffällig ist, dass sich diese Verdichtungswelle in diesem Fall mit 2370 m/s fortbewegt, also mit rund dem siebenfachen der Schallgeschwindigkeit unter Normalbedingungen. Daher herrscht hier ein hoher Druck und, aufgrund einer näherungsweise adiabaten Kompression, auch eine hohe Temperatur. Durch die hohen Geschwindigkeiten kann davon ausgegangen werden, dass Temperatur und Druck im Spalt nicht homogen sind.

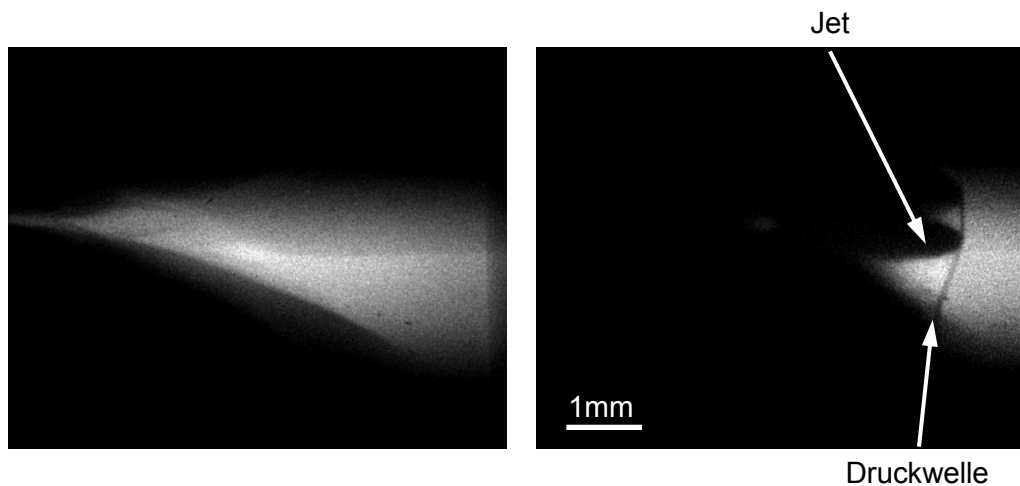


Abbildung 7.12 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom elektromagnetischen Pulsschweißen. Links: Aufnahme beim ersten Kontakt. Rechts: 2,4 μ s später.

Die Temperatur des komprimierten Gases ist messtechnisch nur schwer zu erfassen. In der Literatur finden sich jedoch analytische Abschätzungen bezüglich der erreichbaren Temperaturen [Kos08]. Demnach werden in einer Heliumatmosphäre 970 K erreicht, in Luft 4000 K und in Argonatmosphäre 7250 K. In diese Richtung deutet auch die Auswertung der Ozonkonzentration, die in Abschnitt 6.3 beschrieben wird.

Unter der Annahme, dass die Abschätzungen in [Kos08] korrekt sind, müsste sich die Temperatur der gesamten Probe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des umgebenden Gases ändern, falls ein signifikanter Wärmeübertrag stattfindet. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und Kupfer ist dies denkbar. Wie Abbildung 7.3 zeigt, ist es jedoch nicht der Fall. Unter Argonatmosphäre stellt sich keine signifikante Temperaturerhöhung im Vergleich zu Stickstoff ein, obwohl sich die Temperaturen der Gase stark unterscheiden.

Daraus lässt sich schließen, dass in der Realität kein relevanter Wärmeübergang vom komprimierten Gas in die Fügepartner stattfindet. Neben der analytischen Abschätzung der Temperatur im komprimierten Gas ist zu beachten, dass Argon aufgrund seiner Dichte einen größeren Widerstand für den Jet darstellt und daher dessen Geschwindigkeit reduziert [Pab16b**]. Es ist denkbar, dass die Wärmebilanz in der Fügezone hierdurch beeinflusst wird.

7.4 Zusammenfassung

Für die Erwärmung der Probe stehen drei Energiequellen zur Verfügung: Die makroskopische plastische Deformation, die Fügezone mit der mikroskopischen Deformation sowie eine Verbrennung des Werkstoffs.

Der Energieeintrag in die Probe hat seinen Ursprung hauptsächlich in der plastischen Deformation, die sich aus der kinetischen Energie der Fügepartner speist. Der zusätzliche Energieeintrag bei Verbünden von Aluminium und Stahl hat ihren Ursprung in der Umwandlung chemischer Energie bei der exothermen Oxidation des Grundwerkstoffs während der Kollision. In inerter Atmosphäre tritt dieses Phänomen nicht auf. Auch bei Kupfer, dessen Entzündungstemperatur deutlich höher liegt, ist dies nicht der Fall. Die Kompression des Umgebungsmediums hat keinen feststellbaren Einfluss.

8 Auswirkungen und Beeinflussung des Energieeintrags

Ausgehend von den identifizierten Mechanismen des Energieeintrags lassen sich nicht nur die damit einhergehenden Effekte wie das Prozessleuchten und das Aussehen der Fügezone erklären. Durch gezielte Maßnahmen kann der Energieeintrag auch aktiv beeinflusst werden, um die Eigenschaften der Fügezone gezielt einzustellen.

8.1 Wechselwirkung der Temperatur mit der Fügezone

In [Sha16**] wird gezeigt, dass bei artgleichen Verbindungen von Aluminium ein Erstarrungsgefüge in der Fügezone auftritt. Bei der optischen Mikroskopie wird es üblicherweise als dunklere, durchgängige Zwischenschicht sichtbar. Dies zeigen die Aufnahmen in Abbildung 8.1 für Proben aus EN AW-1050A im Zustand H18 im Analogieversuch bei einem Kollisionswinkel von $5,7^\circ$. Die Dicke der Zwischenschicht schwankt zwar, ist aber immer gut erkennbar. Sie erreicht lokal Dicken von über $10\text{ }\mu\text{m}$. In der Fügezone lässt sich auch hier kein Sauerstoff detektieren, sie beinhaltet also keine Verbrennungsprodukte.

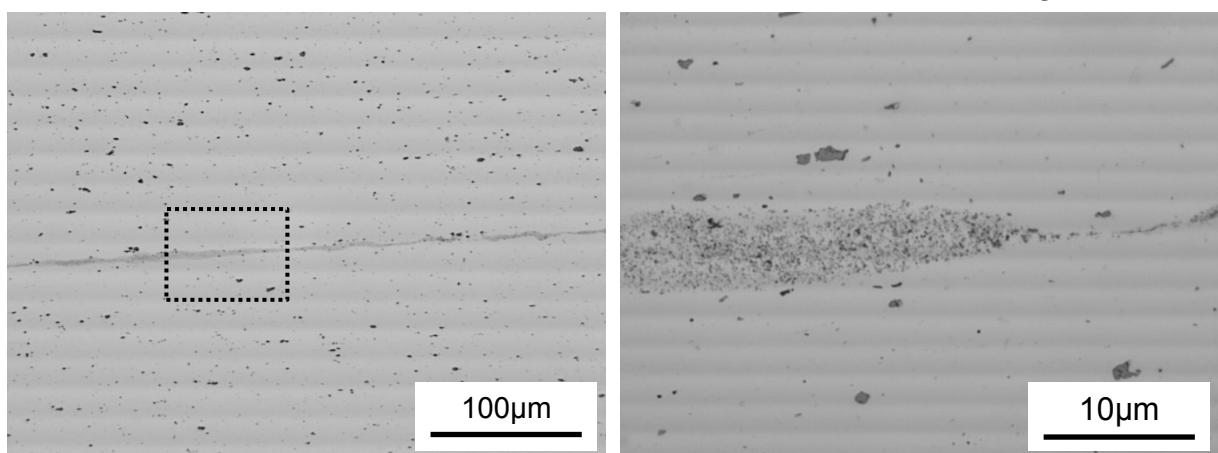


Abbildung 8.1 Mikroschliff der Fügezone von einer Modellversuchspröbe aus EN AW-1050A im Zustand H18 unter einem Kollisionswinkel von $5,7^\circ$.

Die experimentelle Ermittlung des Energieeintrags bei gleichem Werkstoff, jedoch unter der inerten Stickstoffatmosphäre in Abschnitt 7.1 ergeben einen geringeren Betrag als an Luft. Das lässt sich auch an der Fügezone erkennen, wie Abbildung 8.2 zeigt. Die Zwischenschicht ist hier deutlich schwächer ausgeprägt. Außerdem ist hier ihre Dicke homogener als bei der unter Umgebungsluft gefügten Probe. An anderer Stelle lässt sich die Fügezone unter dem Lichtmikroskop gar nicht mehr identifizieren. Dieser Befund ist ein zusätzlicher Beleg für den Einfluss des umgebenden Gases. Mit den bestehenden Erkenntnissen zur eingebrachten Energie und der Ausprägung der Fügezone (Abschnitte 2.4 und 2.5) lässt er sich nicht erklären, weil die Kollisionsparameter identisch sind.

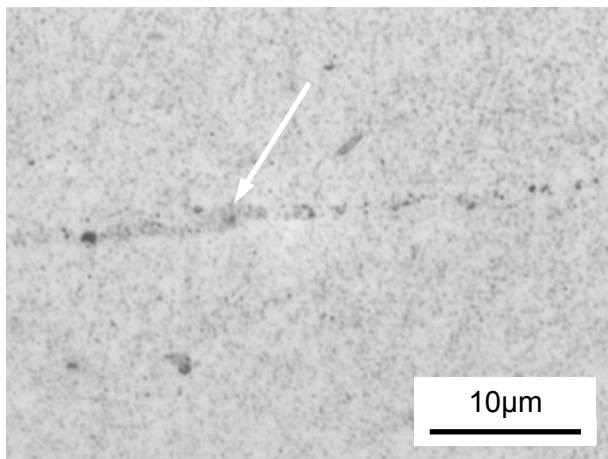


Abbildung 8.2 Mikroschliff der Fügezone von einer Modellversuchsprobe aus EN AW-1050A im Zustand H18 unter einem Kollisionswinkel von 5,7 °, unter Stickstoffatmosphäre.

Unter Argonatmosphäre sind im Analogieversuch keine Schweißungen erzielbar. Der Jet wird beim Austritt aus der Fügezone aufgrund der höheren Dichte behindert, sodass größere Aufprallgeschwindigkeiten notwendig sind [Pab16b**]. Diese lassen sich im Analogieversuch noch nicht erzielen.

Die Proben aus dem weicheren Reinaluminium EN AW-1050A im Zustand H14 weisen in den Versuchen ebenfalls einen geringeren Energieeintrag auf, allerdings bereits an Umgebungsluft. Sie liegen in etwa auf dem Niveau der Proben im Zustand H18 unter Stickstoffatmosphäre, wie in Abschnitt 7.1 gezeigt wird. Auch hier ist die Fügezone teilweise kaum mehr erkennbar, wie Abbildung 8.3 zeigt.

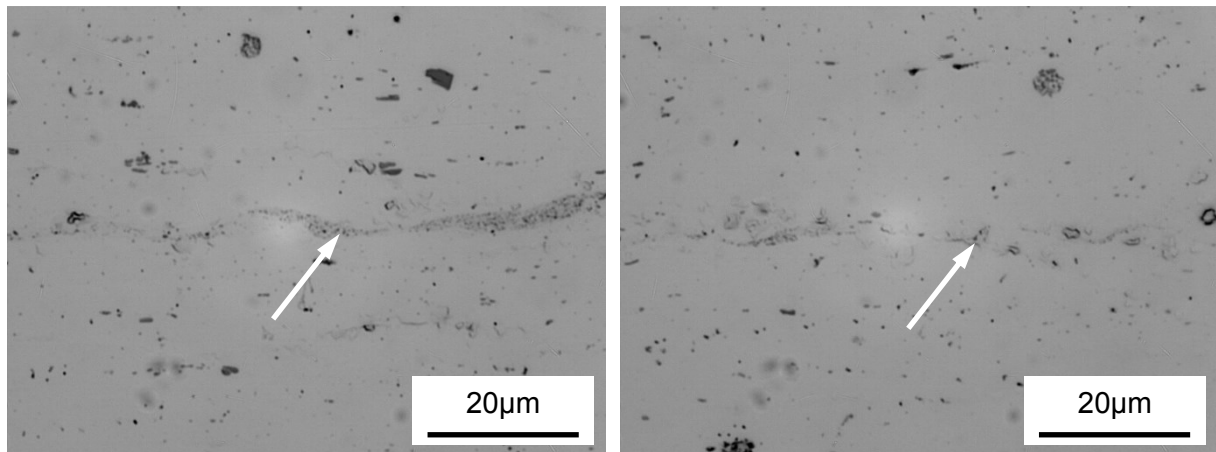


Abbildung 8.3 Mikroschliffe der Fügezone von einer Modellversuchsprobe aus EN AW-1050A H14 unter einem Kollisionswinkel von $5,7^\circ$.

Beide Befunde, Aluminium im Zustand H18 in Stickstoff und im Zustand H14 an Luft belegen, dass die von außen gemessene Temperatur und damit die im Prozess zugeführte Energiemenge Rückschlüsse auf die Fügezone erlauben. Im Fall vom Zustand H18 in Stickstoff wird die Verbrennung durch die inerte Atmosphäre unterbunden, im Fall vom Zustand H14 an Luft entkommt dem sich schließenden Spalt ein größerer Jet, dessen Verbrennung erst weiter außerhalb stattfindet.

Die Oberflächen von nicht gefügten Proben bei Kollisionswinkeln unterhalb des Prozessfensters erlauben weitere Rückschlüsse auf die Mechanismen. Proben unter zu großen Winkeln weisen eine glatte Oberfläche auf. Der Jet ist dort nicht mehr gebildet worden, wohingegen er bei zu kleinen Winkeln zwar gebildet wird, jedoch nicht mehr den sich zu schnell schließenden Spalt verlassen kann. Der Jet führt in der Fügezone zu Fließformen an der Oberfläche. Dies zeigen die Aufnahmen der Probenoberfläche bei zu geringen Winkeln ohne Verbund in Abbildung 8.4.

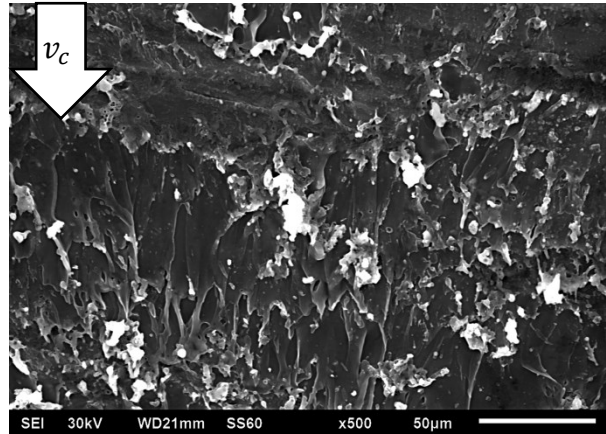
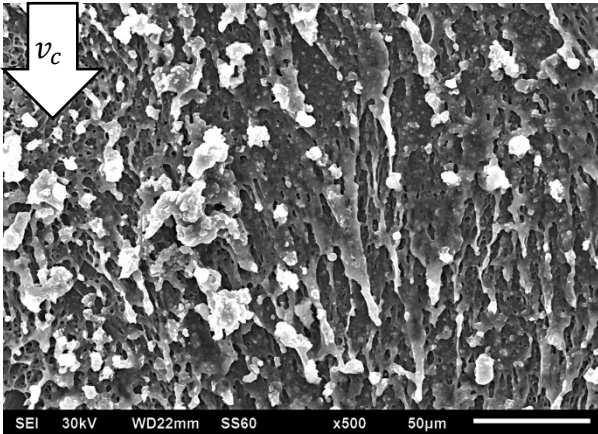
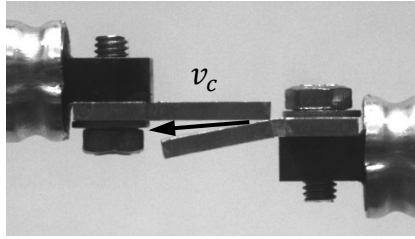


Abbildung 8.4 Oberfläche von Modellversuchsproben mit Fließformen (Kollision von oben nach unten). Links: DC01, rechts: EN AW-1050A H18.

Bei weiterer Vergrößerung in Abbildung 8.5 ist eine schwammartige Struktur mit teilweise sehr feinen Poren im Submikrometerbereich erkennbar.

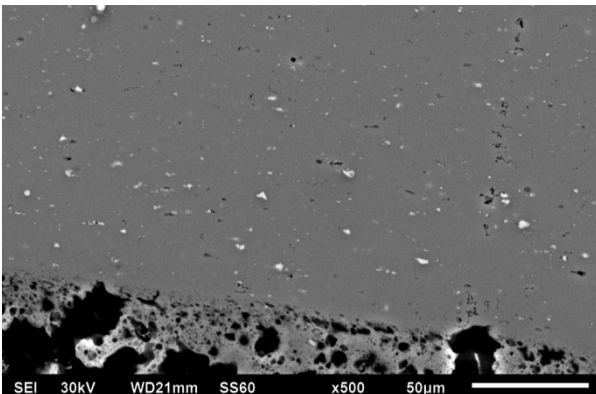
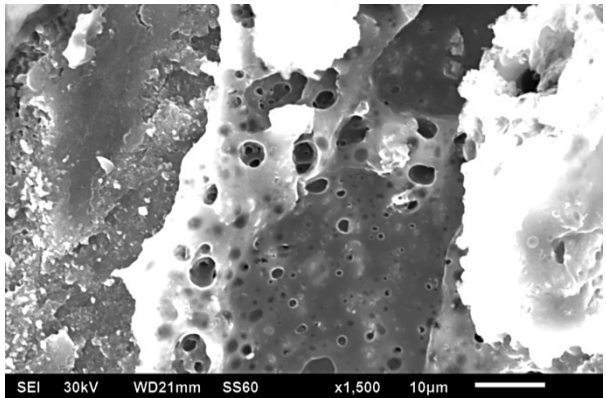
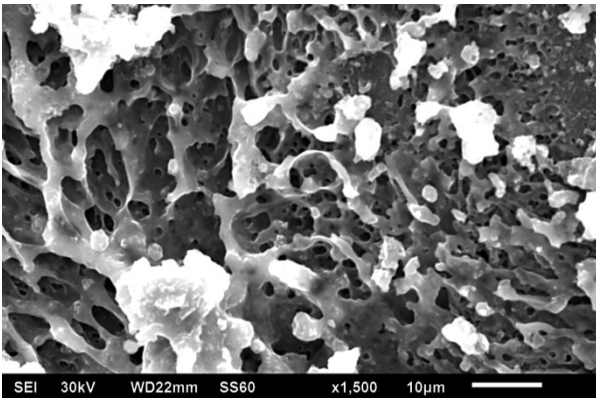


Abbildung 8.5 Vergrößerte Oberfläche der Modellversuchsproben mit porösen Strukturen.

Auf dieser Oberfläche lassen sich zusätzlich zahlreiche spröde Risse feststellen, wie Abbildung 8.6 zeigt. Dabei kann es sich um thermisch induzierte Risse handeln, wenn der aufgeschmolzene Bereich durch das dahinter liegende Grundmaterial abgeschreckt wird.

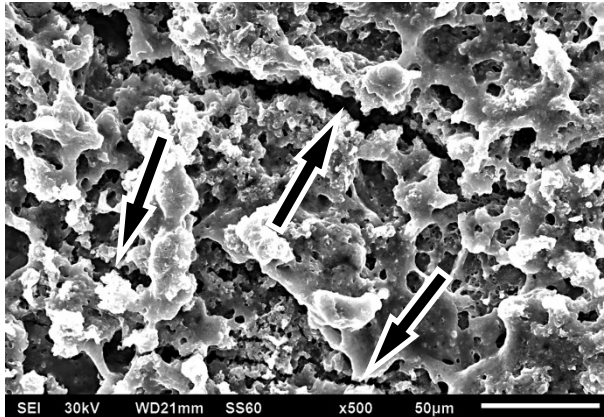


Abbildung 8.6 Oberfläche einer Modellversuchsprobe mit Rissen.

Ähnliche Morphologien entstehen beim Flamspritzen, das in [Gae03] und [Kum11] untersucht wird. Abbildung 8.7 zeigt beispielhaft Aufnahmen aus der Literatur. Auch bei diesem Prozess entsteht eine Art Jet, der aus heißem Metall besteht und mit einer Oberfläche in Kontakt kommt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Jet beim Kollisionsschweißen unter zu kleinen Kollisionswinkeln im Spalt verbleibt.

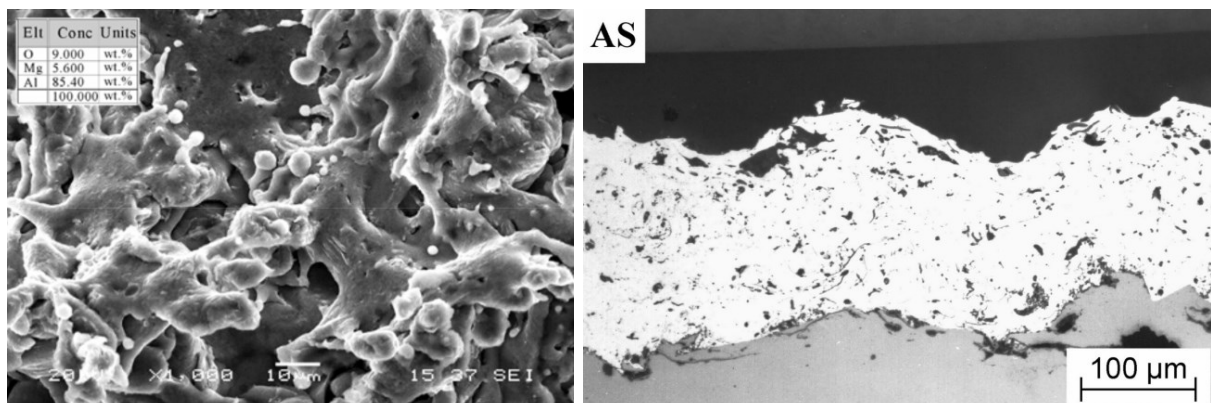


Abbildung 8.7 Links: Draufsicht auf eine Oberfläche durch Drahtflamspritzen mit AlMg6 [Kum11]. Rechts: Querschnitt, Drahtflamspritzen mit AlMg3 [Gae03].

Für die Wechselwirkung der Temperatur mit der Fügezone lässt sich also festhalten: Der gemessene Energieeintrag in eine Probe erlaubt Rückschlüsse auf die Ausprägung der Fügezone. Je geringer die Energie und damit die Temperatur, desto schmaler der geschmolzene Bereich.

8.2 Aktive Beeinflussung des Energieeintrags

Die Untersuchungen zeigen, dass ein großer Teil der Energie in der Fügezone durch die plastische Deformation und auch durch die Verbrennung des Grundmaterials eingebracht wird.

Die plastische Deformation ist verantwortlich für einen Großteil der Erwärmung. Sie ist jedoch inhärenter Bestandteil des Fügeprozesses, sodass ein Eingriff kaum möglich ist. Es ist allerdings erstrebenswert, den Energieeintrag so gering wie möglich zu halten, um einen nachteiligen Einfluss auf das Gefüge zu vermeiden. Das betrifft Risse in der Fügezone durch die Abkühlung sowie zu große intermetallische Phasen bei artungleichen Materialkombinationen. Dies stellt allgemein die obere Grenze des Prozessfensters dar, wie in Abschnitt 2.4 gezeigt wird. Wichtigster Parameter ist dabei die Aufprallgeschwindigkeit zusammen mit dem Winkel. Es sollte also immer nur so viel Energie eingebracht werden, wie zur Erzielung einer Verbindung nötig ist. Die untere Grenze des Prozessfensters kann zusätzlich abgesenkt werden, indem die Dichte des Umgebungsmediums reduziert wird [Pab16b**].

Die Verbrennung lässt sich durch eine inerte Gasatmosphäre unterbinden. Dabei ist zu beachten, dass kein Gas mit einer höheren Dichte als Luft zum Einsatz kommen sollte, da hierdurch die Verbindungseigenschaften ebenfalls verschlechtert werden, wie in [Pab16b**] gezeigt wird. Diese Maßnahme verursacht jedoch aufgrund des benötigten Gases in einer Serienfertigung zusätzliche Kosten, die berücksichtigt werden müssen.

8.3 Ursachen für das Prozessleuchten

Gemäß der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Hypothesen besteht das Prozessleuchten aus drei Komponenten: glühende Jetpartikel, Verbrennung der Jetpartikel und bis zum Plasmazustand erhitztes Umgebungsmedium.

Die Lichtemission durch den bis zum Glühen erhitzten Jet wird in Abschnitt 7.2 mit Versuchen im Vakuum belegt. Die Belege für eine stattfindende Verbrennung des Jets werden in Abschnitt 7.1 dargestellt. Für den Plasmazustand des Umgebungsmediums existieren bislang nur die

analytischen Abschätzungen aus [Kos08]. Sie sollen im Folgenden experimentell belegt werden. Der Modellversuch wird dazu mit Aluminiumproben durchgeführt, die mit einer etwa $130\text{ }\mu\text{m}$ dicken Keramikbeschichtung aus $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 97/3 versehen sind. Abbildung 8.8 zeigt die installierten Proben unmittelbar vor dem Versuch. Die markierten Kupferstreifen berühren sich beim ersten Kontakt der Proben und schließen den Triggerkreis, da die Keramik einen elektrischen Isolator darstellt.

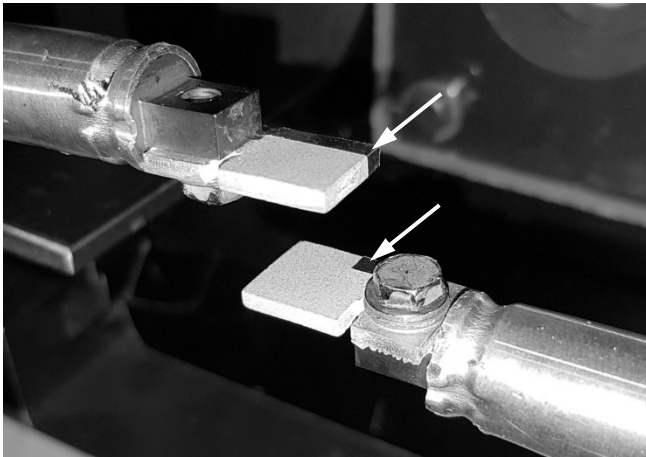


Abbildung 8.8 Installierte keramikbeschichtete Proben vor der Durchführung im Analogieversuch.

Die Langzeitbelichtung von Versuchen unter Umgebungsatmosphäre zeigen ein sehr schwaches Leuchten im sich schließenden Spalt, markiert in Abbildung 8.9. Hierbei kann es sich nicht um eine Verbrennung handeln. Es ist auffällig, dass die Farbe des Leuchtens gelblich bis orange erscheint und sich damit deutlich unterscheidet von Versuchen mit unbeschichtetem Aluminium. Als Erklärung bleibt daher nur die Bildung eines Plasmas.

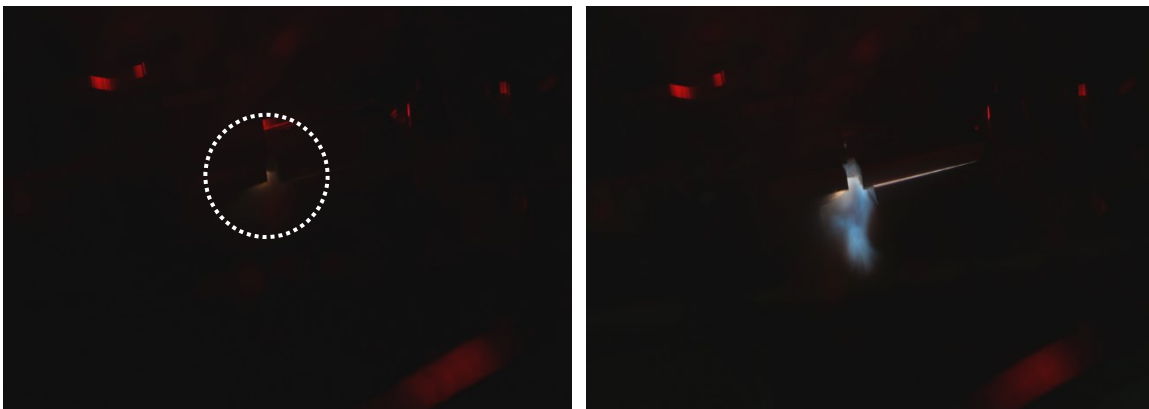


Abbildung 8.9 Links: Langzeitbelichtung des Prozessleuchtens zwischen keramikbeschichteten Proben im Analogieversuch. Rechts: Referenzversuch mit unbeschichteten Proben.

In einer inerten Umgebung findet bei der Kollision keine Verbrennung des Grundmaterials statt, demnach muss das Prozesslicht dunkler ausfallen. Die Versuche mit Aluminium (EN AW-1050A im Zustand H18) in inerter Atmosphäre, ebenfalls im Modellversuch, zeigen zwar auch eine Leuchterscheinung, sie ist allerdings etwas schwächer als bei den Versuchen unter Umgebungsatmosphäre. Einen Vergleich zwischen dem Leuchten in Luft, Stickstoff und Argon zeigt Abbildung 8.10. Alle anderen Versuchsparameter sind identisch, der Winkel beträgt jeweils $5,7^\circ$. Es ist zu beachten, dass in der Argonatmosphäre keine Verbindung möglich ist.

In der Stickstoffatmosphäre ist die Größe des weißen Leuchtens deutlich geringer als Luft, dafür ist ein gelber bis oranger Schleier (Pfeil in Abbildung 8.10 b) deutlicher sichtbar. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um die Bahnlinien der glühenden Jetpartikel, die nicht verbrennen wie auch in Abbildung 7.8 beim elektromagnetischen Pulsschweißen in Unterdruck. Der nach wie vor vorhandene weiße Anteil stammt entweder von stark komprimiertem Stickstoff oder verbrennendem Jet durch den Restsauerstoffgehalt. In der Argonatmosphäre sind diese glühenden Jetpartikel kaum zu erkennen. Aufgrund der höheren Dichte von Argon werden sie wahrscheinlich beim Austritt aus dem Spalt behindert [Pab16b**].

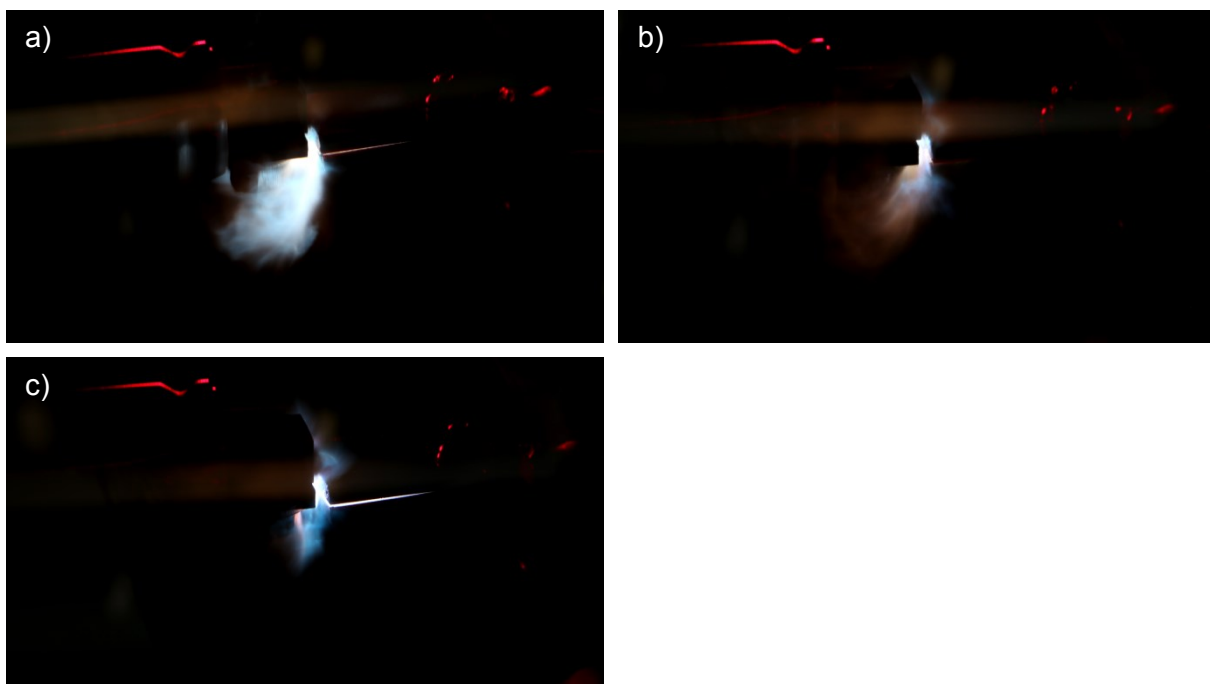


Abbildung 8.10 Prozessleuchten bei unterschiedlichen Gasatmosphären für eine artgleiche Verbindung aus EN AW-1050A im Zustand H18: a) Luft, b) Stickstoff, c) Argon.

Die gezielte Variation der Versuchsumgebung erlaubt es, die Komponenten des Prozessleuchtens getrennt zu identifizieren: In inerter Stickstoffatmosphäre ist der glühende Jet sichtbar. Bei inerter Fügeprobe ist ein Plasma erkennbar. An Luft mit unbehandelten Fügeproben ist die Verbrennung erkennbar.

8.4 Weitere Wechselwirkungen zwischen Umgebung und Prozess

Das Umgebungsmedium beeinflusst nicht nur wie gezeigt den Betrag des Energieeintrags in die Fügezone und damit in die gesamte Probe, sondern auch die Ausprägung des Jets. Untersuchungen in [Ber66] und [Pab16b**] zeigen beispielsweise, dass der Jet im Vakuum beziehungsweise starkem Unterdruck fast doppelt so schnell die Kollisionszone verlässt wie unter atmosphärischen Bedingungen. Auf diese Weise gefügte Verbindungen weisen größere und festere Fügestellen auf, was beim Sprengschweißen auch industriell umgesetzt wird [Bui10]. Nicht bekannt ist allerdings, ob die höhere Festigkeit der Verbindung nur durch ihre größere gefügte Fläche im Vakuum zustande kommt oder ob die relative Festigkeit, also die Festigkeit pro gefügter Fläche, ebenfalls ansteigt. Analog dazu führt eine höhere Dichte zu kleineren und schwächeren Verbänden, was ebenfalls in [Pab16b**] gezeigt wird. Dieser Befund erklärt, warum bei den Versuchen unter Argonatmosphäre im Analogieversuch kein Verbund erzielt werden konnte.

Die von der Gasdichte abhängige Größe der Fügezone lässt sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass der Jet je nach Dichte des Umgebungsmediums unterschiedlich stark gebremst und daher am Austritt gehindert wird. Je besser er durch einen geringeren Strömungswiderstand aus dem Fügespalt entkommen kann, desto eher kann die Verbindung zustande kommen. Querschnitte durch die Fügezone in [Pab16a**] zeigen, dass der gefügte Bereich bei Unterdruck deutlich eher beginnt. Zu Beginn erreichen der Kollisionspunkt und damit der Jet ihre maximale Geschwindigkeit, sodass der Strömungswiderstand hier den größten Einfluss ausübt. Gegen Ende der Kollision sind die Prozessgeschwindigkeiten so weit abgefallen, dass kein Jet

mehr gebildet wird. Damit hat das Umgebungsmedium hier keinen Einfluss mehr. Das Ende der Fügezone wird daher kaum beeinflusst. [Pab18**]

Auswertungen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Prozesses zeigen, dass die Aufprallgeschwindigkeit nicht messbar von der Dichte des Mediums abhängt. Mit Blick auf den Dichteunterschied von mehr als drei Größenordnungen zwischen dem Werkstückwerkstoff und dem Umgebungsmedium ist dies unmittelbar einsichtig. Beim elektromagnetischen Pulsschweißen entspricht das bewegte Werkstückvolumen in etwa dem verdrängten Gasvolumen. [Pab18**]

Die kinetische Energie des Jets lässt sich mit den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen nicht verlässlich bestimmen, da seine Dichte unbekannt ist. Aus analytischen Überlegungen folgt jedoch, dass die kinetische Energie des Jets bei geringerer Gasdichte höher sein muss als bei größerer Gasdichte. Die Bildung des Jets ist von der Gasdichte unabhängig, sodass seine Masse in beiden Fällen identisch ist. Allerdings wird seine Geschwindigkeit mit steigender Gasdichte verringert. Damit handelt es sich hierbei um ein rein strömungsmechanisches Phänomen. Denkbar ist, dass die unterschiedlich lange Verweildauer des Jets in der Fügezone deren Temperaturfeld beeinflusst. Wenn der Jet eine längere Zeit benötigt, um die Fügezone zu verlassen, kann von ihm eine höhere thermische Energie in die Fügepartner eingebracht werden. Vor allem bei artungleichen Verbünden können dann stärker ausgeprägte intermetallische Phasen die Folge sein.

8.5 Zusammenfassung

Eine Verringerung des Energieeintrages in die Fügezone und damit in die gesamte Probe manifestiert sich unmittelbar in einer dünneren und homogeneeren Fügezone. Der Energieeintrag kann über die Parameter der Kollision und die damit verbundene plastische Deformation sowie über die Reaktivität des umgebenden Gases kontrolliert werden.

Das Prozessleuchten besteht aus drei Komponenten: Der glühende Jet, komprimiertes Gas sowie brennende Jetpartikel haben je nach beteiligten Werkstoffen und Gasen einen unterschiedlichen Anteil.

9 Beantwortung der Fragestellungen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die Fragestellungen aus Kapitel 3 nun beantworten.

1. Welche Temperaturen werden in der Fügezone erreicht?

Bei den untersuchten Verbindungen aus Aluminium beträgt die Temperatur in der Fügezone mindestens etwa 700 °C, was zum Aufschmelzen oberflächennaher Bereiche notwendig ist. Wahrscheinlich liegt die Temperatur noch höher, um 1000 °C. Bei Aluminium ist daher in der Fügezone ein Erstarrungsgefüge erkennbar, bei dem höherschmelzenden Kupfer jedoch nicht. Bei inerter Atmosphäre liegt die Temperatur zwar darunter, sie übersteigt jedoch nach wie vor zumindest lokal die Schmelztemperatur von Aluminium.

2. Woher stammt die Energie für die Temperaturerhöhung in der Fügezone?

Die mikroskopische plastische Deformation in der Fügezone beziehungsweise der daraus resultierende Jet stellen die größten Energiequellen dar. Die Verbrennung des Jets am Luftsauerstoff ist die dritte Energiequelle im Fügebereich. Die Kompression des umgebenden Gases liefert keinen messbaren Beitrag.

3. Wie kann die Temperatur in der Fügezone beeinflusst werden?

Eine Verringerung der plastischen Deformation durch eine geringere kinetische Energie der Fügepartner, was einer Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit entspricht, führt unmittelbar zu einem geringeren Energieeintrag. Durch den Einsatz eines inerten Gases mit zusätzlich einer geringeren Dichte als Luft lässt sich die erforderliche Geschwindigkeit bei gleichbleibender Festigkeit der Verbindung weiter reduzieren.

4. Welche Auswirkungen haben die Temperatur sowie deren Erhöhung auf die Eigenschaften der Verbindung?

Je höher der Energieeintrag wird, umso größer wird auch der geschmolzene und wieder erstarrte Bereich um die Fügezone. In dem Zuge können sich Heißrisse oder ein unvorteilhaftes Erstarrungsgefüge ausbilden. Bei artungleichen Verbindungen wächst zudem die intermetallische Phase und die mechanischen Eigenschaften der Verbindung verschlechtern sich.

5. Welchen Effekt hat die Temperaturerhöhung auf die Ausbildung des (ultra-)feinkörnigen Gefüges in der Fügezone?

Das ultrafeinkörnige Gefüge wird bereits durch die mikroskopische plastische Deformation am und hinter dem Kollisionspunkt gebildet. Hier bestehen Ähnlichkeiten zum Reibrührschweißen. Dieser Prozess wird überlagert durch den Energieeintrag, wodurch das Gefüge bei entsprechend niedriger schmelzenden Werkstoffen wie Aluminium durch Aufschmelzen und Erstarren zu einem gerichteten Erstarrungsgefüge wird.

6. Wie entsteht das Prozessleuchten während der Kollision?

Das Prozessleuchten hat drei Anteile, die abhängig von der Zusammensetzung des Umgebungsmediums und vom Material der Fügepartner unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Aufgrund der mikroskopischen plastischen Deformation erreicht das ausgestoßene Grundmaterial des Jets bereits ausreichend hohe Temperaturen, um als gelb bis orange glühend wahrgenommen zu werden. Wenn Sauerstoff verfügbar ist, verbrennt der Jet, was sich in einem sehr hellen Leuchten manifestiert. Die Überschallkompression des Umgebungsmediums führt dazu, dass es den Plasmazustand erreicht und ebenfalls Licht im sichtbaren Spektrum emittieren kann.

10 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich die Ausbildung der Fügezone über die Temperaturführung beeinflussen lässt. Dieses Wissen kann in der Praxis genutzt werden, um vor allem herausfordernde Werkstoffkombinationen besser schweißen zu können. Bestehende Prozesse können optimiert werden, sodass ein geringerer Energieeinsatz notwendig ist. Die Nutzung eines leichteren Inertgases als Luft kann beispielsweise helfen, einen Verbund bereits bei geringeren Aufprallgeschwindigkeiten zu erzeugen.

Die Kenntnis über das Zustandekommen des Prozessleuchtens ermöglicht die Entwicklung einer darauf basierenden Prozessüberwachung. Die zeitliche Erfassung und spektrale Untersuchung des Prozesslichts kann daher als Kriterium zur Qualitätssicherung in der Produktion dienen. Zumindest für die Grundlagenuntersuchungen ist eine zeitlich hoch aufgelöste spektrale Spektroskopie vielversprechend [Bel17]. Damit lassen sich auch mögliche, bislang unbekannte Wechselwirkungen zwischen den Fügepartnern und dem umgebenden Gas identifizieren, die möglicherweise im sich schließenden Spalt ablaufen.

Bei den Untersuchungen ist bislang die strömungsmechanische Wechselwirkung zwischen Jet und Umgebungsmedium unberücksichtigt geblieben. Aufgrund der großen Oberfläche des staubförmigen Jets dargestellt in Abbildung 7.12 in Abschnitt 7.3 ist sie jedoch signifikant, wie in [Pab16b**] gezeigt wird. Die Ergebnisse aus der Veröffentlichung deuten darauf hin, dass die kinetische Energie des Jets ein Maß für die Festigkeit des Verbunds sein kann. Die Geschwindigkeit und damit die Energie werden allerdings durch die Dichte des Gases stark beeinflusst. Um die Ergebnisse mit unterschiedlichen Gasen vom Vakuum bis zu schweren (Edel-)Gasen und deren Einfluss auf die Temperatur der Fügezone sowie deren mechanische Eigenschaften genau untersuchen zu können, muss diese Wechselwirkung jedoch verstanden sein. Der am Austritt behinderte heiße Jet könnte beispielsweise ähnliche Folgen haben wie eine höhere Temperatur durch eine höhere Aufprallenergie.

Die numerische Simulation kann hier bei der Entwicklung des Verständnisses helfen, bedarf allerdings weiterer Entwicklung. Die Einbeziehung des Umgebungsmediums ist bislang noch nicht durchgeführt worden.

Neben der Morphologie, der Gefügestruktur sowie der Zusammensetzung der Fügezone sind für die Anwendung vor allem die mechanischen Eigenschaften der Verbindung relevant. Es ist daher zu klären, inwiefern unterschiedliche Temperaturen und Jetausbildungen Einfluss darauf nehmen. Vor allem bei artungleichen Werkstoffkombinationen wie beispielsweise Aluminium und Stahl für den Strukturbau kommt der Ausbildung der intermetallischen Phase eine große Bedeutung zu. Deren quantitative Abhängigkeit von Jet und Temperatur ist ebenfalls noch ungeklärt. Gleiches gilt für den Einfluss unterschiedlicher Dicken und Zusammensetzungen dieser Schicht auf die Verbindungseigenschaften.

Beim Stoffschluss ist zu klären, ob hier unterschiedliche Stufen existieren oder vereinfacht von einem binären System „Verbund“ und „kein Verbund“ ausgegangen werden kann. Schwächere Anbindungen könnten aus gefügten und nicht gefügten Bereichen im Wechsel bestehen, wobei deren jeweilige Anteile die Gesamtfestigkeit beeinflussen, die beispielsweise im Zugversuch gemessen wird. Falls allerdings Zwischenstufen bestehen, sind die Mechanismen der Entstehung zu identifizieren. In diesem Fall ließe sich aus der Festigkeit nicht auf die Größe der Fügezone schließen und umgekehrt, was beispielsweise für die zerstörungsfreie Prüfung mittels Ultraschall relevant ist. In der Literatur ist diese Möglichkeit bislang nicht untersucht worden.

Die Temperaturmessung lässt sich ebenfalls verbessern und bereits während der Kollision durchführen, um einen zeitlich hoch aufgelösten Verlauf zu erhalten. Infrage kommen beispielsweise Laserlumineszenz oder Hochgeschwindigkeitsthermographie. Der Aufwand ist jedoch in beiden Fällen ungleich höher als bei dem vorgestellten Verfahren.

Die hier gefundenen Zusammenhänge gelten zunächst nur für die untersuchten Werkstoffe. Die Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe und Werkstoffkombinationen steht dabei noch aus. Hier sind neue Phänomene zu erwarten.

11 Zusammenfassung

Das gasförmige Umgebungsmedium beim Kollisionsschweißen hat einen relevanten Einfluss auf das Zustandekommen und die Qualität der Verbindung, vor allem bei Beteiligung von Aluminium. Ursächlich ist primär die Reaktivität des umgebenden Gases. Wenn eine Verbrennung stattfinden kann, erhöht sich der Energieeintrag. Dies lässt sich messtechnisch an einer erhöhten Temperatur der gesamten Probe erfassen. Daneben beeinflusst die Jetausbildung die Energiebilanz, was sich beim direkten Vergleich zwischen gleichen Aluminiumlegierungen in unterschiedlichem Zustand zeigt. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass das Zustandekommen der Verbindung ebenfalls energetisch nachweisbar ist. Die Größenordnung der Energien liegt dabei deutlich über den Werten aus der Literatur.

Mit dem Verfahren des Kollisionsschweißens wird oftmals nur die plastische Deformation assoziiert. Tatsächlich treten in der Fügezone Temperaturen um 1000 °C auf, zusammen mit Begleiterscheinungen wie einem Erstarrungsgefüge oder intermetallischen Phasen bei artungleichen Verbünden.

Die Ergebnisse stellen einen weiteren Baustein dar, um den Prozess besser zu verstehen und Effekte in der Anwendung vorteilhaft nutzbar zu machen. Der Fokus liegt auf der Temperatur in der Fügezone, über die sich deren Gestalt beeinflussen lässt. Insbesondere bei artungleichen Fügepartnern, bei denen eine ausgeprägte intermetallische Phase in aller Regel nachteilig ist und zu vermeiden versucht wird, kann dieses Wissen umgesetzt werden. Inerte Gase in der Fügezone, vorzugsweise mit einer geringeren Dichte als Luft, können die Größe und Qualität der Fügezone verbessern. Im Hinblick auf die strömungsmechanische Wechselwirkung des Jets mit dem Umgebungsmedium ergeben sich neue Aufgabenstellungen mit dem gleichen Ziel. Die Identifikation des Prozesslichts als aussagekräftiger Parameter wird für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten relevant sein.

12 Zitierte Literaturstellen

12.1 Betreute studentische Arbeiten

- [Aul15*] Aulbach, D., 2015: Experimentelle Untersuchung des emittierten Prozesslichtes beim Kollisionsfügen. Bachelorarbeit.
- [Bec15*] Becker, M., 2015: Experimentelle Prozessfensterermittlung beim Kollisionsfügen. Bachelorarbeit.
- [Die15*] Dierbach, F., 2015: Optimierung der Regelung und des Bewegungsablaufes an einem Versuchstand zum Schweißen mit kinetischer Energie. Bachelorarbeit.
- [Kre13*] Krebs, F., 2013: Experimentelle Untersuchung der Einflussfaktoren beim stoffschlüssigen Fügen mit kinetischer Energie. Bachelorarbeit.
- [Pos16*] Post, F., 2016. Abgleich von Simulationsdaten mit den Versuchsdaten beim Kollisionsschweißen. Bachelorarbeit.
- [Roe14*] Röth, J., 2014: Untersuchung und Interpretation des emittierten Lichtspektrums beim stoffschlüssigen Fügen durch Hochgeschwindigkeitsaufprall. Bachelorarbeit.
- [Web13*] Weber, P., 2013: Instrumentierung und Erweiterung des Versuchsstandes zum stoffschlüssigen Fügen mit kinetischer Energie. Bachelorarbeit.

12.2 Veröffentlichungen mit eigener Beteiligung

- [Gro14**] Groche, P., Wagner, M.F.-X., Pabst, C., Sharafiev, S., 2014: Development of a novel test rig to investigate the fundamentals of impact welding. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 204, S. 2009-2017. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.10.008.

-
- [Gro15**] Groche, P., Pabst, C., 2015: Numerical Simulation of Impact Welding Processes with LS-DYNA. In: 10th European LS-DYNA Conference 2015.
- [Gro17**] Groche, P., Becker, M., Pabst, C., 2017: Process window acquisition for impact welding processes. In: Materials and Design, Bd. 118, S. 286-293. doi: 10.1016/j.matdes.2017.01.013.
- [Pab16a**] Pabst, C., Groche, P., 2016: The influence of thermal and mechanical effects on the bond formation during impact welding. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 309-320. doi: 10.17877/DE290R-16997.
- [Pab16b**] Pabst, C., Groche, P., 2016: Identification of Process Parameters in Electromagnetic Pulse Welding and Their Utilisation to Expand the Process Window. In: International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. Bd. 6 (1), S. 69-73. doi: 10.18178/ijmmm.2018.6.1.349.
- [Pab18**] Pabst, C., Pasquale, P., 2018: Identification of additional process parameters for impact welding and their influence on the process window. In: 8th International Conference on High Speed Forming.
- [Sha16**] Sharafiev, S., Pabst, C., Wagner, M.F.-X., Groche, P., 2016: Microstructural characterisation of interfaces in magnetic pulse welded aluminum/aluminum joints. In: 18th Chemnitz Seminar on Materials Engineering – 18. Werkstofftechnisches Kolloquium; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bd. 118. doi: 0.1088/1757-899X/118/1/012016.

12.3 Sonstige Literaturstellen

- [Aiz04] Aizawa, T., 2004: Methods for electromagnetic pressure seam welding of Al/Fe sheets. In: Welding International, Bd. 18, S. 868-872. doi:10.1533/wint.2004.3346.
- [Aiz07] Aizawa, T., Kashani, M., Okagawa, K., 2007: Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints. In: Welding Journal, Bd. 86, S. 119ff.

- [Akb05] Akbari Mousavi, A.A., Al-Hassani, S.T.S., 2005. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Bd. 53, S. 2501-2528. doi: 10.1016/j.jmps.2005.06.001.
- [Akb09] Akbari-Mousavi, S.A.A., Farhadi Sartangi, P., 2009: Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel. In: Materials and Design, Bd. 30, S. 459-468. doi: 10.1016/j.matdes.2008.06.016.
- [Ale88] Alexander, D.E., Was, G.S., Mayer, F.J., 1988: Laser-driven micro-explosive bonding of aluminium films to copper and silicon. In: Journal of Materials Science, Bd. 23, S. 2181-2186. doi: 10.1007/BF01115786.
- [Ame87] Amelina, L.S., Gaek, Yu.V., Sviridenko, A.N., 1970: Estimation of the energy of the bimetallic explosive bonding process. In: Combustion, Explosion, and Shock Waves, Bd. 6, S. 316-19. doi: 10.1007/BF00742506.
- [ASM93] Olson, D.L., 1993: ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, Bd. 6, S. 303-305. ISBN: 978-0-87170-382-8.
- [ASM06] Semiatin, S.L., 2006: ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming, Bd. 14, S. 405-418. ISBN: 978-0-87170-710-9.
- [Bae13] Baehr H.D., Stephan K., 2013: Wärmestrahlung. In: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Vieweg. Online ISBN: 978-3-642-36558-4. doi: 10.1007/978-3-642-36558-4_5.
- [Bah67] Bahrani, A.S., Black, T.J., Crossland, B., 1967: The mechanics of wave formation in explosive welding. In: Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Bd. 296, S. 123ff.
- [Bel16] Bellmann, J., Lueg-Althoff, J., Goebel, G., Gies, S., Beyer, E., Tekkaya, A.E., 2016: Effects of Surface Coatings on the Joint Formation During Magnetic Pulse Welding in Tube-to-Cylinder Configuration. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 125ff. doi: 10.17877/DE290R-16994.

-
- [Bel17] Bellmann, J., 2017: Persönliches Gespräch am 17. Oktober.
- [Bel18] Bellmann, J., Lueg-Althoff, J., Schulze, S., Gies, S., Beyer, E., Tekkaya, A. E., 2018: Parameter Identification for Magnetic Pulse Welding Applications. In: Key Engineering Materials, Bd. 767, S. 431-438. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.767.431>.
- [Bel19] Bellmann, J., Lueg-Althoff, J., Schulze, S., Hahn, M., Gies, S., Beyer, E., Tekkaya, A. E., 2019: Thermal Effects in Dissimilar Magnetic Pulse Welding. In: Metals. Bd. 9. doi: [doi:10.3390/met9030348](https://doi.org/10.3390/met9030348).
- [Ben10] Ben-Artzy, A., Stern, A., Frage, N., Shribman, V., Sadot, O., 2010: Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. In: International Journal of Impact Engineering, Bd. 37, S. 397ff.
- [Ber66] Bergmann, O.R., Cowan, G.R., Holtzman, A.H., 1966: Experimental Evidence of Jet Formation During Explosion Cladding. In: Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Bd. 236, S. 646ff.
- [Bol98] Bolobov, V.I., Berezin, A.Yu., 1998: Conditions for Ignition of Copper and Copper Alloys in Oxygen. In: Combustion, Explosion, and Shock Waves, Bd. 34, S. 159-162. doi: [10.1007/BF02672815](https://doi.org/10.1007/BF02672815).
- [Bor16] Borchers, C., Lenz, M., Deutges, M., Klein, H., Gärtner, F., Hammerschmidt, M., Kreye, H., 2016: Microstructure and mechanical properties of medium-carbon steel bonded on low-carbon steel by explosive welding. In: Materials and Design, Bd. 89, S. 369-376. doi: [10.1016/j.matdes.2015.09.164](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.164).
- [Bui10] Buijs, N.W., 2010: Explosive welding of metals in a vacuum environment. In: Stainless Steel World, Bd. 3.
- [Car04] Carton, E.P., 2004: Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding. In: Materials Science Forum, Bd. 465-466, S. 219ff.
- [Car44] Carl, L.R., 1944: Brass welds, made by detonation impulse. In: Metal Progress, Bd. 46, S. 102-103.
- [Car75] Carpenter, S.H., Wittman, R.H., 1975: Explosion Welding. In: Annual Review of Materials Science, Bd. 5, S. 177ff.

- [Che16] Chen, S., Daehn, G.S., Vivek, A., Liu, B., Hansen, S.R., Huang, J., Lin, S., 2016: Interfacial microstructures and mechanical property of vaporizing foil actuator welding of aluminium alloy to steel. In: Materials Science and Engineering A, Bd. 659, S. 12-21. doi: 10.1016/j.msea.2016.02.040.
- [Chi04] Chiba, A., Nishida, M., Morizono, Y., 2004: Microstructure of Bonding Interface in Explosively-Welded Clads and Bonding Mechanism. In: Materials Science Forum, Bd. 465-466, S. 465-474. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.465-466.465.
- [Cow63] Cowan, G.R., Holtzman, A.H., 1963. Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding. In: Journal of Applied Physics, Bd. 34, S. 928-939.
- [Cow71] Cowan, G.R., Bergmann, O.R., Holtzman, A.H., 1971. Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosion-Clad Metals. In: Metallurgical Transactions, Bd. 2, S. 3145-3155.
- [Cro82] Crossland, B., 1982: Explosive Welding of Metals and its Application. In: Oxford University Press.
- [Cuq14] Cuq-Lelandais, J.-P., Ferreira, S., Avrillaud, G., Mazars, G., Rauffet, B., 2014: Magnetic Pulse Welding: welding windows and high velocity impact simulations. In: 6th International Conference on High Speed Forming, S. 199-206.
- [Cuq16] Cuq-Lelandais, J.-P., Avrillaud, G., Ferreira, S., Mazars, G., Nottebaert, A., Teilla, G., Shribman, V., 2016: 3D Impacts Modeling of the Magnetic Pulse Welding Process and Comparison to Experimental Data. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 13-22. doi: 10.17877/DE290R-16969.
- [Dem92] Demichev, V.F., 1992. The use of strong-pulsed magnetic fields to weld metals. Originally in: Atomnaya Energiya, Bd. 73, S. 278-284. Translated in: Atomic Energy, 1993, Bd. 25, S. 793-198.
- [Der67] Deribas, A.A., Kudinov, V.M., Matveenkov, F.I., Simonov, V.A., 1967: Determination of the impact parameters of flat plates in explosive welding. In: Combustion, Explosion and Shock Waves, Bd. 3, S. 182-186. doi: 10.1007/BF00748745.

-
- [Der68] Deribas, A.A., Kudinov, V.M., Matveenkov, F.I., Simonov, V.A., 1968: Simulation of the process of wave formation in explosive welding. In: Combustion, Explosion and Shock Waves, Bd.4, S. 59-63. doi: 10.1007/BF00843076.
- [Dre01] Drennov, O.B., 2001: Structure of a Shaped Jet Formed in an Oblique Collision of Flat Metal Plates. In: Combustion, Explosion, and Shock Waves, Bd.37, S. 359-365. doi: 10.1023/A:1017592310483.
- [Els10a] Elsen, A., Ludwig, M., Schäfer, R., Groche, P., 2010: Fundamentals of EMPT-Welding. In: 4th International Conference on High Speed Forming, S. 117ff.
- [Els10b] Elsen, A., Ludwig, M., Schäfer, R., Groche, P., 2010: Basic principles and associated mechanisms of electromagnetic pulse welding. In: 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, S. 651-662.
- [Eng13] Engels, A.M., 2013: Beitrag zur Temperaturprognose in kombinierten Tiefzieh- und Abstreckgleitziehprozessen. In: Berichte aus production und Umformtechnik, Bd.89. doi: 10.2370/9783844023275.
- [Fae10] Faes, K., Baaten, T., De Waele, W., Debroux, N., 2010: Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding. In: 4th International Conference on High Speed Forming, S. 84-96. doi: 10.17877/DE290R-8664.
- [Fan14] Fan, Z., Yu, H., Li, C., 2014: A Numerical Investigation on Magnetic Pulse Cladding of Bi-Metal Tubes. In: 6th International Conference on High Speed Forming, S. 151-160. doi: 10.17877/DE290R-833.
- [Far25] Farren, W.S., Taylor, G.I., 1925: The Heat Development during Plastic Extension of Metals. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Bd. 107, S. 422-451. doi: 10.1098/rspa.1925.0034.
- [Fis77] Fischer, A.G., 1977: Werkstoffe der Elektrotechnik. Vorlesungsskript, Dortmund.

- [Gae03] Gärtner, F., Voyer, J., Xiumei, Qi, Kreye, H., Richter, H.J., Krömmer, W., 2003: New Challenges for Wire and Rod Flame Spraying. In: 6th High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying Colloquium, S. 61-71.
- [Gey12] Geyer, M., Böhm, S., 2012: Influence of contact surface on weldability with electromagnetic pulses. In: IIW Denver Annual Assembly.
- [Gey14] Geyer, M., Rebensdorf, A., Böhm, S., 2014: Influence of the Boundary Layer in Magnetic Pulse Sheet Welds of Aluminium to Steel. In: 6th International Conference on High Speed Forming, S. 51-60. doi: 10.17877/DE290R-16039.
- [Gey15] Geyer, M., 2015: Magnetpulsschweißen von Aluminium und Stahl - Einflüsse der Topografie auf Verbindungsausbildung und Festigkeit. Dissertation. ISBN: 978-3-8440-4185-9.
- [Göb10] Göbel, G., Kaspar, J., Herrmannsdörfer, T., Brenner, B., Beyer, E., 2010: Insights into intermetallic phases on pulse welded dissimilar metal joints. In: 4th International Conference on High Speed Forming, S. 127ff.
- [God71] Godunov, S.K., Deribas, A.A., Kozin, N.S., 1971. Wave formation in explosive welding. In: Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Bd. 12, S. 398-406.
- [Gor78] Gordopolov, Y.A., Dremin, A.N., Mikhailov, A.N., 1978. Theory of waves on the interface of metals welded by explosion. In: Combustion, Explosion and Shock Waves, Bd. 14, S. 472-480.
- [Gri04] Grignon, F., Benson, D., Vecchio, K.S., Meyers, M.A., 2004. Explosive welding of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments. In: International Journal of Impact Engineering, Bd. 30, S. 1333-1351. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.049.
- [Gro87] Groschopp, J., Heyne, V., Hofmann, B., 1987: Explosivplattieren unter Vakuumbedingungen. In: ZIS Mitteilungen, Bd. 29, S. 135-139.

-
- [Gul08] Gulenc, B., 2008. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. In: *Materials and Design*, Bd.29, S.175-278. doi: 10.1016/j.matdes.2006.11.001.
- [Her15] Hermann, J., 2015: Persönliches Gespräch und Email vom 1. September.
- [HeS16] He, J., Sirois, D., Li, S., Sullivan, A., Wikle, C., 2016: Ballistic impact welding of copper to low carbon steel. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd.232, S.165-174. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.01.029.
- [Ito16] Itoi, T., Bin Mohamad, A., Suzuki, R., Okagawa, K., 2016: Microstructure evolution of a dissimilar junction interface between an Al sheet and a Ni-coated Cu sheet joined by magnetic pulse welding. In: *Materials Characterization*, Bd. 118, S. 142-148. doi: 10.1016/j.matchar.2016.05.021.
- [Jac64] Jacobson, M., Cooper, A.R., Nagy, J., 1964: Explosibility of metal powders. In: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
- [Jar87a] Jaramillo, D., Inal, O.T., Szecket, A., 1987: Effect of base plate thickness on wave size and wave morphology in explosively welded couples. In: *Journal of Materials Science*, Bd.22, S. 3143ff.
- [Jar87b] Jaramillo, D., Szecket, A., Inal, O.T., 1987: On the transition from a waveless to a wavy interface in explosive welding. In: *Materials Science and Engineering*, Bd.91, S.217-222. doi: 10.1016/0025-5416(87)90300-4.
- [Kah05] Kahraman, N., Gülenç, B., Findik, F., 2005. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 169, S. 127-133. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045.
- [Kas10] Kashani, M., Aizawa, T., Okagawa, K., 2010. Welding and Forming of Sheet Metals by Using Magnetic Pulse Welding (MPW) Technique. In: *4th International Conference on High Speed Forming*.

- [Kal10] Kallee, S., Schäfer, R., Pasquale, P., 2010: Einsatz der Elektromagnetischen Puls Technologie (EMPT) - Anwendungsmöglichkeiten im Anlagen- und Behälterbau. In: Schweißen im Anlagen- und Behälterbau 2010, Sondertagung München, S. 47-52.
- [Kol15] Kolbe, M., Kolbe, P., Wagner, A., 2015: Entwicklung hochwärmefester Bauteile durch Explosivplattieren für Großmotoren in der Schifffahrt. In: 5. IfP-Symposium Produktionstechnik, WHZ Zwickau.
- [Kor07] Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V., 2007: Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. In: International Journal of Impact Engineering, Bd.4, S. 1327ff.
- [Kor08] Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V., 2008: Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd.208, S.486-493. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.01.039.
- [Kos08] Koschlig, M., Veehmayer, M., Raabe, D., 2008. Production of Steel-Light Metal Compounds with Explosive Metal Cladding. In: 3rd International Conference on High Speed Forming, S. 23ff.
- [Kow71] Kowalick, J.F., Hay, D.R., 1971: A mechanism of explosive bonding. In: Metallurgical Transactions, Bd.2, S. 1953-1958. doi: 10.1007/BF02913429.
- [Kum11] Kumruoglu, L.C., Ustel, F., Ozel, A., Mimaroglu, A., 2011: Micro Arc Oxidation of Wire Arc Sprayed Al-Mg6, Al-Si12, Al Coatings on Low Alloyed Steel. In: Engineering, Bd.3, S.680-690. doi: 10.4236/eng.2011.37081.
- [Kur15] Kurzweil, P., 2015: Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente. Springer-Verlag. ISBN: 978-3-658-08660-2.

-
- [Lee07] Lee, K.-J., Kumai, S., Arai, T., Aizawa, T., 2007: Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding. In: Materials Science and Engineering A, Bd.471, S.95-101. doi: 10.1016/j.msea.2007.04.033.
- [Lue16] Lueg-Althoff, J., Schilling, B., Bellmann, J., Gies, S., Schulze, S., Tekkaya, A.E., Beyer, E., 2016: Influence of the Wall Thicknesses on the Joint Quality During Magnetic Pulse Welding in Tube-to-Tube Configuration. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 259-268. doi: 10.17877/DE290R-16992.
- [Lys12] Lysak, V.I., Kuzmin, S.V., 2012: Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd.212, S. 150-156. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.017.
- [Man06] Manikandan, P., Hokamoto, K., Deribas, A.A., Raghukandan, K., Tomoshige, R., 2006: Explosive Welding of Titanium/Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions. In: Materials Transactions, Bd. 47, S. 2049-2055. doi: 10.2320/matertrans.47.2049.
- [Man14] Manogaran, A.P., Manoharan, P., Priem, D., Marya, S., Racineux, G., 2014: Magnetic pulse spot welding of bimetals. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd.214, S. 1236-1244. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.01.007.
- [Men13] Mendes, R., Ribeiro, J.B., Loureiro, A., 2013: Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration. In: Material and Design, Bd. 52, S. 182-192. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.069.
- [McG09] McGinley, J., 2009: Electromagnetic Pulse Technology as a Means of Joining Generation IV Cladding Materials. In: 17th International Conference on Nuclear Engineering, Bd. 1, S. 627-632. doi: 10.1115/ICONE17-75630.
- [Mil98] Miller, G.H., 1998: Jetting in Oblique, Asymmetric Impacts. In: Icarus, Bd. 134, S. 163-175. doi: 10.1006/icar.1998.5945.

- [Man06] Manikandan, P., Hokamoto, K., Deribas, A.A., Raghukandan, K., Tomoshige, R., 2006. Explosive Welding of Titanium/Stainless Steel by Controlling Energetic Conditions. In: Materials Transactions, Bd. 47, S. 2049-2055. doi: 10.2320/matertrans.47.2049.
- [Mar05] Marya, M., Marya, S., Priem, D., 2005: On The Characteristics of Electromagnetic Welds Between Aluminium and other Metals and Alloys. In: Welding in the World, Bd. 49, S. 74-84. doi: 10.1007/BF03263412.
- [Nas15] Nassiri, A., Chini, G., Vivek, A., Daehn, G., Kinsey, B., 2015: Arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element simulation and experimental investigation of wavy interfacial morphology during high velocity impact welding. In: Materials and Design, Bd. 88, S. 345-358. doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.005.
- [Nie18] Niessen, B., Franceschi, A., Groche, P., 2018: Proofs and Contradictions for Wave Formation Theories in Collision Welding. In: Key Engineering Materials, Bd. 767, S. 447-455. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.767.447>.
- [Oeb85] Öberg, Å., Mårtensson, N., Schweitz, J.-Å., 1985: Fundamental Aspects of Formation and Stability of Explosive Welds. In: Metallurgical Transactions A, Bd. 16, S. 841-852. doi: 10.1007/BF02814835.
- [Oka04] Okagawa, K., Aizawa, T., 2004: Impact Seam Welding with Magnetic Pressure for Aluminum Sheets. In: Materials Science Forum, Bd. 465-466, S. 231ff.
- [Oli14] Oliveira, I., Teixeira, P., Reis, A., 2014: Magnetic Pulse Welding of dissimilar metals: Influence of process parameters. In: 6th International Conference on High Speed Forming, S. 117-126.
- [Oxf01] Oxford Lasers, 2001: Applications brief. <https://www.oxfordlasers.com/wp-content/uploads/2012/06/appvbrite.pdf>, abgerufen am 06.08.2017.

-
- [PCO04] PCO AG, 2004. Bedienungsanleitung hsfc-pro. https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/db/download/MA_HPOPID_0411.pdf, abgerufen am 23.03.2018.
- [Pai06] Pai, V.V., Luk'yanov, Ya.L., Kuz'min, G.E., Yakovlev, I.V., 2006: Wave Formation in a High-Velocity Symmetric Impact of Metal Plates. In: Combustion, Explosion, and Shock Waves, Bd. 42, S. 611ff.
- [Pel18] Pelz, P.F., Kuhr, M.M.G., 2018: Interface instability of an inelastic normal collision. In: Archive of Applied Mechanics, Bd. 88., S. 1945-1951. doi: 10.1007/s00419-018-1420-8.
- [Pru77] Prümmer, R.A., 1977: Explosive cladding of thin films. In Thin Solid Films, Bd. 45., S. 205-210. doi: 10.1016/0040-6090(77)90227-9.
- [Rao13] Raoelison, R.N., Buiron, N., Rachik, M., Haye, D., Franz, G., Habak, M., 2013: Study of the elaboration of a practical weldability window in magnetic pulse welding. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 214, S. 1348ff.
- [Rao14] Raoelison, R.N., Racine, D., Zhang, Z., Buiron, N., Marceau, D., Rachik, M., 2014: Magnetic pulse welding: Interface of Al/Cu joint and investigation of intermetallic formation effect on the weld features. In: Journal of Manufacturing Processes, Bd. 16, S. 427-434. doi: 10.1016/j.jmapro.2014.05.002.
- [Rao15] Raoelison, R.N., Sapanathan, T., Buiron, N., Rachik, M., 2015: Magnetic pulse welding of Al/Al and Al/Cu metal pairs: Consequences of the dissimilar combination on the interfacial behavior during the welding process. In: Journal of Manufacturing Processes, Bd. 20, S. 112-127. doi: 10.1016/j.jmapro.2015.09.003.
- [Reb16a] Rebensdorf, A., Böhm, S., 2016: Increase of the Reproducibility of Joints Welded with Magnetic Pulse Technology Using Graded Surface Topographies. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 125ff. doi: 10.17877/DE290R-16979.

- [Reb16b] Rebensdorf, A., Kümper, S., Grünwald, W., Böhm, S., 2016: Einsatz der Magnetimpulstechnologie (MPT) zum Fügen von hochfesten Stahl-Aluminium-Verbindungen im Dünnschleibbereich. In: DVS-Media, DVS-Berichte 327 (DVS-Congress 2016), S. 371-376.
- [Sch10] Schäfer, R., Pasquale, P., 2010: Electromagnetic pulse forming technology. Keys for allocating the industrial market segment. In: 4th International Conference on High Speed Forming, S. 16-25. doi: 10.17877/DE290R-8148.
- [Ser09] Serizawa, H., Shibahara, I., Rashed, S., Murakawa, H., 2009: Numerical Study of Joining Process in Magnetic Pressure Seam Welding. In: Transactions of JWRI, Bd. 38, S. 63-68.
- [Shi14] Shim, J.Y., Park, D.H., Kim, I.S., Kang, B.Y., 2014: Effect of Process Variables on the Al/Cu Weldment Using DOE for Magnetic Pulse Welding Process. In: 6th International Conference on High Speed Forming, S. 107-116.
- [Shr69] Shribman, V., Bahrani, A.S., Crossland, B., 1969: The Techniques and the Mechanism of Explosive Welding. In: Production Engineer, Bd. 48, S. 69-83. doi: 10.1049/tpe:19690005.
- [Shr08] Shribman, V., 2008: Magnetic Pulse Welding for Dissimilar and Similar Materials. In: 3rd International Conference on High Speed Forming, S. 13-22. doi: 10.17877/DE290R-13057.
- [Son11a] Song, J., Kostka, A., Veehmayer, M., Raabe, D., 2011: Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding. In: Materials Science and Engineering A, Bd. 528, S. 2641-2647. doi: 10.1016/j.msea.2010.11.092.
- [Son11b] Song, J., 2011: Microstructure and properties of interfaces formed by explosion cladding of Titanium to low Carbon steel. Dissertation.
- [Spr11] Springer, H.J., 2011: Fundamental Research into the Role of Intermetallic Phases in Joining of Aluminium Alloys to Steel. Dissertation.

-
- [Ste14] Stern, A., Shribman, V., Ben-Artzy, A., Aizenshtein, M., 2014: Interface Phenomena and Bonding Mechanism in Magnetic Pulse Welding. In: Journal of Materials Engineering and Performance, Bd. 23, S. 3449-3458. doi: 10.1007/s11665-014-1143-0.
- [Tru05] Trunov, M.A., Schoenitz, M., Dreizin, E.L., 2005: Ignition of Aluminum Powders Under Different Experimental Conditions. In: Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Bd. 30, S. 36-43. doi: 10.1002/prep.200400083.
- [Tur95] Turgutlu, A., Al-Hassani, S.T.S., Akyurt, M., 1995: Experimental investigation of deformation and jetting during impact spot welding. In: International Journal of Impact Engineering, Bd. 16, S. 789-799. doi: 10.1016/0734-743X(95)00013-Z.
- [Viv13] Vivek, A., Hansen, S.R., Liu, B.C., Daehn, G.S., 2013: Vaporizing foil actuator: A tool for collision welding. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 213, S. 2304-2311. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.07.006.
- [Viv14] Vivek, A., Liu, B.C., Hansen, S.R., Daehn, G.S., 2014: Accessing collision welding process window for titanium/copper welds with vaporizing foil actuators and grooved targets. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 214, S. 1583-1589. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.007.
- [Viv16] Vivek, A., Wright, S.M., Liu, B.C., Hansen, S.R., Brune, R.C., Thurston, B.P., Taber, G.A., Lee, T., Mao, Y., Dittrich, T.J., Daehn, G.S., 2016: Benchmarking and Refining the Vaporizing Foil Actuator Spot Welding Process. In: 7th International Conference on High Speed Forming, S. 298-297. doi: 10.17877/DE290R-16995.
- [Wan12] Wang, X., Zheng, Y., Liu, H., Shen, Z., Hu, Y., Li, W., Gao, Y., Guo, C., 2012: Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using Smoothed Particle Hydrodynamics method. In: Materials and Design, Bd. 35, S. 210-219. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.047.

- [Wan15] Wang, F., Shen, J., Li, W., dos Santos, J.F., 2015: Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy. In: *Materials & Design*, Bd. 86, S. 933-940. doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.096.
- [Wat06] Watanabe, M., Kumai, S., Aizawa, T., 2006: Interfacial microstructure of magnetic pressure seam welded Al-Fe, Al-Ni and Al-Cu lap joints. In: *Materials Science Forum*, Bd. 519-521, S. 1145-1150. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1145.
- [Wat09] Watanabe, M., Kumai, S., 2009: High-Speed Deformation and Collision Behavior of Pure Aluminum Plates in Magnetic Pulse Welding. In: *Materials Transactions*, Bd. 50, S. 2035-2042. doi: 10.2320/matertrans.L-M2009816.
- [YuF14] Yu, H., Fan, Z., Li, C., 2014: Magnetic pulse cladding of aluminum alloy on mild steel tube. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 214, S. 141-150. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.08.013.
- [YuX12] Yu, H., Xu, Z., Jiang, H., Zhao, Z., Li, C., 2012: Magnetic pulse joining of aluminum alloy-carbon steel tubes. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Bd. 22, S. 548-552. doi: 10.1016/S1003-6326(12)61759-2.
- [YuX13] Yu, H., Xu, Z., Fan, Z., Zhao, Z., Li, C., 2013: Mechanical property and microstructure of aluminium alloy-steel tubes joint by magnetic pulse welding. In: *Materials Science and Engineering A*, Bd. 561, S. 259-265. doi: 10.1016/j.msea.2012.11.015.
- [Zam12] Zamani, E., Liaghat, G.H., 2012: Explosive welding of stainless steel-carbon steel coaxial pipes. In: *Journal of Materials Science*, Bd. 47, S. 685-695. doi: 10.1007/s10853-011-5841-9.
- [Zha10a] Zhang, Y., Babu, S., Daehn, G.S., 2010: Impact Welding in a Variety of Geometric Configurations. In: *4th International Conference on High Speed Forming*, S. 97-107. doi: 10.17877/DE290R-8635.

-
- [Zha10b] Zhang, Y., Babu, S.S., Daehn, G.S., 2010: Interfacial ultrafine-grained structures on aluminum alloy 6061 joint and copper alloy 110 joint fabricated by magnetic pulse welding. In: Journal of Materials Science, Bd. 45, S. 4645-4651. doi: 10.1007/s10853-010-4676-0.

13 Glossar

Im Rahmen der Arbeit werden Begriffe eingeführt und benutzt, die im Kontext der Arbeit eine bestimmte Bedeutung besitzen. Die folgende Aufstellung gibt eine kurze Erläuterung dieser Begriffe.

Begriff	Erläuterung	Einführung
artgleich	(metallische) Werkstoffe mit identischem Hauptlegierungsbestandteil	S. 23
artungleich	(metallische) Werkstoffe mit nicht identischem Hauptlegierungsbestandteil	S. 1
Black Box	System, das eine unbekannte Verknüpfung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen aufweist	S. 21
Brisanz	Zertrümmerungsvermögen eines explosiven Stoffes	S. 15
Energieeintrag	in den Prozess unbewusst eingetragene, nicht direkt quantifizierbare Energie	S. 67
Energiezufuhr	dem Prozess bewusst zugeführte, quantifizierbare Energie	S. 75
Fügezone	Bereich zwischen den Fügepartnern, in der Regel nur wenige Mikrometer dick	S. 4
in situ	während des Prozesses stattfindend	S. 33
Jet	Partikelstrom, der aus der Fügezone ausgestoßen wird	S. 6
Long Distance Microscope	Mikroskop mit besonders großer Gegenstandsweite	S. 59
Makroskopische Formänderung	Formänderung in der Größenordnung über etwa 10 µm	S. 13
Mikroskopische Formänderung	Formänderung in der Größenordnung unter etwa 10 µm	S. 13
Morphologie	Form, hier: Form der Fügezone	S. 14

Nachkollision	unerwünschte Kollision der Proben nach der eigentlichen, für den Prozess relevanten Kollision	S. 54
Rekristallisation	Neubildung von Körnern im metallischen Werkstoffgefüge	S. 27

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Schematische Darstellung des Prozessablaufs beim Kollisionsschweißen.	3
Abbildung 2.2	Schematische Darstellung des Sprengschweißens an einem Querschnitt durch den Prozess.	5
Abbildung 2.3	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Sprengschweißen [Ber66].	6
Abbildung 2.4	Beispielhafter, gemessener Stromverlauf an einem System bestehend aus Pulsgenerator und Blechschweißspule.	9
Abbildung 2.5	Schematische Darstellung der elektromagnetischen Induktion am Beispiel einer Kompressionsspule mit Rohr, nach [Kal10].	9
Abbildung 2.6	Systematische Übersicht über die technologieunabhängigen Parameter.	11
Abbildung 2.7	Systematische Übersicht über die technologieabhängigen Parameter.	12
Abbildung 2.8	Makroskopische und mikroskopische Formänderung am Beispiel des Sprengschweißens.	13
Abbildung 2.9	Qualitatives Prozessfenster [Lys12].	16
Abbildung 2.10	Lage konstanter Energieniveaus im Prozessfenster.	18
Abbildung 2.11	Bildsequenz von elektromagnetischen Pulsschweißen von Blech [Wat09].	20
Abbildung 2.12	Beispielhafte Darstellung der wellenförmigen Fügezone bei der artgleichen Verbindung von EN AW-6061 T6 [Els10]. ..	23
Abbildung 2.13	Wellenbildung ohne Störung (a), forcierte Wellenbildung durch eingebrachte Störung bei identischer Reynoldszahl (b) und Stabilisierung bei niedrigerer Reynoldszahl (c) [Pai06].	24
Abbildung 2.14	Welleninitiierung durch Schockeffekte [Ben10].	25
Abbildung 2.15	Ultrafeinkörniges Gefüge bei einer artungleichen Verbindung aus Titan mit Stahl, gefügt durch Sprengschweißen [Son11b].	26

Abbildung 2.16	Ergebnisse aus dem Zugversuch an Aluminium-Stahl Schweißungen [Kas10]. Die Proben versagen im Aluminium.....	27
Abbildung 2.17	Ergebnisse der Mikrohärtemessung an einem Aluminium-Kupfer Verbund [Ito16], Werte in HV.....	28
Abbildung 2.18	Ergebnisse der Mikrohärtemessung an artgleichen Verbänden aus EN AW-6061 (links) und Kupfer (rechts, 2.0060) [Zha10b].	28
Abbildung 2.19	Artgleiche Fügezone zwischen EN AW-1050A [Gro14**]..	29
Abbildung 2.20	Artgleiche Fügezone zwischen EN AW-7075 [Ste14].	29
Abbildung 2.21	Sprengplattierte Verbindung von Titan (oben) mit Stahl [Son11a].	30
Abbildung 2.22	Verbindung von EN AW-3003 (oben) und 1.7218 [Che16].	30
Abbildung 2.23	Verbindung von Aluminium (oben) mit Kupfer [Rao15].	30
Abbildung 2.24	Sprenggeschweißte Verbindung mit zu hoher Energie von Inconel mit rostfreiem Stahl mit Poren [Car75].	31
Abbildung 2.25	Stängelförmiges Gefüge in der Fügezone bei einer artgleichen Kupferverbindung [Cow63].	32
Abbildung 2.26	Jetbildung am Kollisionspunkt (oben: [Cro82, S.17]; unten: [Car75]).	35
Abbildung 4.1	Schematischer Aufbau für das elektromagnetische Pulsschweißen. Links: vor dem Schweißen. Mitte: nach dem Schweißen. Rechts: Foto der Schweißprobe.....	46
Abbildung 4.2	Darstellung des Versuchsaufbaus. Oben: Frontalansicht. Unten: Detailaufnahme des Kollisionsbereichs mit den Proben im Winkel zueinander und den Probenhaltern an den Rotoren.....	47
Abbildung 4.3	Oben: Geometrie einer Probe (Aluminium). Unten: gefügte Probe mit auslegungsgemäß versagten Sollbruchstellen..	48
Abbildung 4.4	Eine Antriebseinheit des Versuchsstands.....	49
Abbildung 4.5	Probenhalter und Rotorrohr vor (unten) und nach (oben) dem Crimpen.....	49
Abbildung 4.6	Startkonfiguration der beiden Rotoren (oben) und Vorbeilaufen der Proben während der Beschleunigungsphase (unten).....	50

Abbildung 4.7	Einhausung um den Versuchsstand. Im Vordergrund die Kamera und der Zugang mit Fenster.	52
Abbildung 4.8	Schematischer Aufbau der Triggerschaltung.	53
Abbildung 4.9	Oberflächenrauigkeit der Proben im Lieferzustand, nach [Kre13*].....	55
Abbildung 5.1	Schematische Darstellung eines Bildverstärkers [PCO04].	58
Abbildung 5.2	Bildverstärkerkamera und long distance microscope am Versuchsstand.....	59
Abbildung 5.3	Links: Auflichtaufnahme, die Kanten sind lasergeschnitten. Rechts: Durchlichtaufnahme mit Schockwellen im Fügespalt und an der Oberseite.....	61
Abbildung 5.4	Links: Durchlichtaufnahme des elektromagnetischen Pulsschweißens. Oben und rechts: Schematische Darstellung.	62
Abbildung 5.5	Aufnahme des Prozessleuchtens, das sich nach der Kollision ausbreitet (F/11, ISO-100, 100 mm Brennweite). Rechts: der selbe Bildausschnitt vor dem Versuch zur besseren Darstellung.	63
Abbildung 5.6	Links: Einseitig schwarz lackierte Probe vor dem Versuch. Rechts: gefügte Probe nach dem Versuch.....	64
Abbildung 5.7	Links: Aufnahme mit der Wärmebildkamera von einer gefügten Probe unmittelbar nach der Kollision im Fangnetz. Rechts: Foto der selben Probe.....	65
Abbildung 5.8	Gemessener Temperaturverlauf im Messbereich auf der Probenoberfläche. Der auswertbare Bereich beginnt bei 12,2 s.	66
Abbildung 5.9	Links: Gemessener Temperaturverlauf, einfach exponentieller Fit und doppelt exponentieller Fit. Rechts: Berechnete Funktionsparameter.	67
Abbildung 5.10	Lage der Systemgrenze für den ersten Hauptsatz für die Versuchsproben.	68
Abbildung 5.11	Gefügte Probe mit einer Delle durch eine Nachkollision mit einem Rotor.	69
Abbildung 5.12	Betrag des Energieeintrags ohne Einbezug der plastischen Deformation durch Nachkollisionen (links), die Korrelation zwischen deformiertem Werkstoffvolumen und	

	Energieeintrag (Mitte) und dem entsprechend bereinigten Energieeintrag (rechts).....	70
Abbildung 6.1	Schematische Darstellung der Abschätzungen und Messungen für den Energieeintrag in eine Probe.....	77
Abbildung 6.2	Theoretische Energiezufuhren und experimentell ermittelte Energieeinträge für verschiedene Werkstoffkombinationen. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.	78
Abbildung 6.3	EBSD Aufnahme der Fügezone einer durch elektromagnetisches Pulsschweißen gefügten Verbindung aus Aluminium (EN AW-1050A H18) [Sha16**].	80
Abbildung 6.4	EBSD Aufnahme der Fügezone einer durch elektromagnetisches Pulsschweißen gefügten Verbindung aus Kupfer (2.0060).....	80
Abbildung 6.5	EBSD Aufnahmen einer reibrührgeschweißten Verbindung aus AA2198 [Wan15].	81
Abbildung 6.6	Energieeinträge für artgleiche Aluminium- und Kupferproben in Abhängigkeit der Verbindungsausbildung.....	83
Abbildung 6.7	Energieeintrag in Abhängigkeit vom Kollisionswinkel für die artgleiche Kupferverbindung.	85
Abbildung 6.8	Energieeintrag in Abhängigkeit vom Kollisionswinkel für die artgleiche Aluminiumverbindung im Zustand H18.....	85
Abbildung 7.1	Jet in der Kameraaufnahme beim elektromagnetischen Pulsschweißen nach [Pab18**].	88
Abbildung 7.2	Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 unter Umgebungsluft und in Stickstoffatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.	89
Abbildung 7.3	Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 unter Umgebungsluft, in Stickstoff- und in Argonatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.....	90
Abbildung 7.4	Energieeintrag für hartes (H18) und halbhartes (H14) Aluminium EN AW-1050A. Zum Vergleich: Zustand H18 in Stickstoff- und Argonatmosphäre. In Klammern darunter die Anzahl der ausgewerteten Versuche.	91

Abbildung 7.5	Energieeintrag bei artgleichen Aluminiumproben im Zustand H18 und zusätzlich aufgebrachtener Beölung.....	92
Abbildung 7.6	Langzeitbelichtungen von verschiedenen Kollisionen: Aluminium-Aluminium (H18) ohne (a) und mit zusätzlicher Beölung (b), im Zustand H14 (c) und Aluminium (H18)-Kupfer (d).....	93
Abbildung 7.7	Vergleich der Oberflächen nicht gefügter Proben mit (links) und ohne Beölung (rechts).	94
Abbildung 7.8	Langzeitbeleuchtung beim elektromagnetischen Pulsschweißen der artgleichen Kombination von Aluminium (EN AW-1050A H18) bei Umgebungsdruck (links) und Unterdruck (rechts).	96
Abbildung 7.9	Plancksches Strahlungsspektrum nach [Bae13, S. 650].	96
Abbildung 7.10	Ausschnitt der Fügezone aus einer Modellversuchsprobe.	97
Abbildung 7.11	Aufnahmen vom Versuchsstand: 1,24 μ s (links) und 2,08 μ s (rechts) nach dem ersten Kontakt.	98
Abbildung 7.12	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom elektromagnetischen Pulsschweißen. Links: Aufnahme beim ersten Kontakt. Rechts: 2,4 μ s später.....	99
Abbildung 8.1	Mikroschliff der Fügezone von einer Modellversuchsprobe aus EN AW-1050A im Zustand H18 unter einem Kollisionswinkel von 5,7 °.	101
Abbildung 8.2	Mikroschliff der Fügezone von einer Modellversuchsprobe aus EN AW-1050A im Zustand H18 unter einem Kollisionswinkel von 5,7 °, unter Stickstoffatmosphäre. ...	102
Abbildung 8.3	Mikroschliffe der Fügezone von einer Modellversuchsprobe aus EN AW-1050A H14 unter einem Kollisionswinkel von 5,7 °.	103
Abbildung 8.4	Oberfläche von Modellversuchsproben mit Fließformen (Kollision von oben nach unten). Links: DC01, rechts: EN AW-1050A H18.	104
Abbildung 8.5	Vergrößerte Oberfläche der Modellversuchsproben mit porösen Strukturen.	104
Abbildung 8.6	Oberfläche einer Modellversuchsprobe mit Rissen.....	105

Abbildung 8.7	Links: Draufsicht auf eine Oberfläche durch Drahtflammspritzen mit AlMg6 [Kum11]. Rechts: Querschnitt, Drahtflammspritzen mit AlMg3 [Gae03]......	105
Abbildung 8.8	Installierte keramikbeschichtete Proben vor der Durchführung im Analogieversuch.	107
Abbildung 8.9	Links: Langzeitbelichtung des Prozessleuchtens zwischen keramikbeschichteten Proben im Analogieversuch. Rechts: Referenzversuch mit unbeschichteten Proben.	107
Abbildung 8.10	Prozessleuchten bei unterschiedlichen Gasatmosphären für eine artgleiche Verbindung aus EN AW-1050A im Zustand H18: a) Luft, b) Stickstoff, c) Argon.	108

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Gemessene Festigkeitswerte der beiden Zustände der verwendeten Aluminiumlegierung EN AW-1050A.....	55
Tabelle 5.1	Parameter für Gleichung 5.1	68
Tabelle 6.1	Kinetische Energien für verschiedene Probenkombinationen.	76

16 Danksagung

Am Gelingen dieser Arbeit hatten die nachfolgend genannten Menschen einen relevanten Anteil, indem sie mich bei der Arbeit unterstützten. Für die Hilfe und Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle bedanken. Die Liste erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Julian Sinz; Simone Schmitt; Johannes Hohmann; Claudia Baltes; Alexander Duschka; Barbara Seifert; Eleni Lazaridis; Pierre L'Éplattenier; Johanna Schreiner; Gabriele von Laufenberg; Mahmut Özel; Anatoli Rebensdorf; Christoph Taplick; Stefan Ditscher; Florian Dietrich; Ingolf Kunz; Pablo Pasquale; Andreas Sander; Andreas Hirsch; Balint Rajkó; Victor Shribman; Wiktorija Morkwitsch; André Krumpe; Dominik Kraus; Annemie Stöckigt; Tilmann Traub; Marco Becker; Philipp Stein; Angelika Philipp; Peter Wenzel; Sandra Zeller; Alexander Elsen; Jens Röth; Hans Pleli; Matthias Völkl; Roswitha Mania; Manfred Miltenberger; Julian Steen; Matthias Scheitza; Konstatin Poßner; Fred Becker; Martin Krech; Günter Ambrosy; Kim Müller; Ursula Schwarz; Marco Gerner; İñaki Çaldichoury; Anna Dimitrova; Gianna D'Agostino; Simone Pasquale; Simon Wohletz; Matthias Christiany; Paul Weber; Karsten Stephan; Nina Chalotte Pabst; Ralf Boelcke; Kerstin Gutierrez; Nicole Bahner; Sebastian Zang; Christiane Gerlitzky; Stefan Calmano; Katrin Schallert; Tassilo Fäth; Henning Husmann; Maxwell Ammons; Semen Sharafiev; Jiang Chenglin; Sara Hasenstab; Eugen Schumacher; Claudia Wasmund; Ursula Hildebrandt; Manuel Neuwirth; Diana Aulbach; Manuel Ludwig; Jörg Avemann; Christian Müller; Bernd Gruhne; Horst Ludwig; Jessica Schmitt-Örtling; Norman Möller; Roland Bitsch; Helmut Conrads; Julia Voit; Jürgen Geißler; Carolin Englert; Lennart Wießner; Stephanie Keller; Julia Gensch; Christian Ludwig; Benedikt Niessen; Okan Görtan; Erwin Babilek; Klaus Dieter Giess; Christoph Strobel; Christoph Müller; Noah Steinberg; Jan Kolbinger; Martin Wagner; Florian Dierbach; Magdalena Moron; Peter Sticht; Ralph Schäfer; Sebastian Schmitt; Andreas Mampel; Matthias Brenneis; Stefan Köhler; Maike Größer; Philipp Kramer; Klaus Weimar; Wilken Franke; Sabine Passet; Ahmad Abrass; Felix Rullmann; Marcel Pleli; Jörg Stahlmann; Hüssein Develioglu; Rafael Pasquale; Martin Sommer; Markus Geyer; Franziska Resch; David Übelacker; Julia Larocca; Mathias Liewald; Florian Krebs; Michael Hase; Toni Sorcan; Barbara Schulz; Manuel Steitz; Matthias Moneke; Mirko Feick; Isabella Dörfel; Martin Storbeck; Alfred Frühauf; Steff-Sabine Pabst; Angelika Riemann; Sarah Mank; Mesut Ibis; Dominik Huttel; Frederic Bäcker; Roman Haaf; Arne Mann; Marco Bassendowski; Heike Syha; Manfred Dresselhaus; Flora Sporer; Markus Czernia; Rebecca Wörner; Philip Beiter; Julius Schröder; Hartmut Hoffmann; Wilhelm Schmidt; Thomas Kessler; Stefan Kallee; Tu Wei; Isabel Scheiding; Gerhard Haunert; Wolfram Schmitt; Vinzent Monnerjahn; Peter Groche; Walter Tutsch; Benjamin Heß; Viktor Recklin; Renata Grosch; Kornelia Omet; Florian Hoppe; Annette Metz; Daniel Hesse; Jonathan Schnabel